



Eduardo Alberto
Manuel Figueira dos
Santos

Desenvolvimento de uma garra robótica para
operações de *bin-picking*



Eduardo Alberto
Manuel Figueira dos
Santos

**Desenvolvimento de uma garra robótica para
operações de *bin-picking***

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Vítor Manuel Ferreira dos Santos, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo
Professor Associado da Universidade de Aveiro

vogais

Doutor Fernando Gomes de Almeida
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Doutor Vítor Manuel Ferreira dos Santos
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Mestre Abílio Manuel Ribeiro Borges
Professor Assistente da Universidade de Aveiro

agradecimentos / acknowledgements

A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio e ajuda de diversas pessoas. Aproveito, por isso, esta oportunidade para agradecer a todas elas.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Doutor Vítor Santos por todo o apoio, disponibilidade, paciência e confiança depositada em mim. Sem ele, a conclusão deste trabalho não seria possível.

Agradeço também ao Professor Mestre Abílio Borges pelo seu apoio e disponibilidade.

Gostaria de agradecer ao Eduardo Durana, ao Hugo Tavares e ao restante pessoal do Laboratório de Automação e Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, pelo companheirismo e pela ajuda prestada.

Agradeço ao Eng. António Festas pela disponibilidade e ajuda no processo de concepção, fabrico e montagem das diversas peças do protótipo.

Um grande obrigado ao Daniel Afonso, à Joana Pereira, ao Mauro Simões, ao Miguel Mieiro, ao Rodrigo Coelho e a todos os restantes amigos por toda a ajuda e apoio. Um especial abraço ao Dan pela imensa ajuda e companheirismo ao longo deste trabalho e um beijo à Ju por todo o apoio e companhia. Sem vocês a realização deste trabalho teria sido bem mais difícil.

Finalmente, queria agradecer à minha Mãe e à minha Tia por toda a ajuda, confiança, paciência, apoio e muitas outras coisas dadas ao longo da minha vida. E aos meus avós, que mesmo já não estando presentes, contribuíram para o meu crescimento como pessoa e sempre acreditaram em mim. Sem todos vocês não seria a pessoa que sou hoje. Obrigado.

Ah!! E não esquecendo a minha guitarra pelos momentos de descontração que me proporcionou.

Palavras-chave

Robótica industrial, *bin-picking*, manipulação flexível, retroacção visual.

Resumo

O *bin-picking* é um problema que só recentemente ganhou notoriedade e começou a ter desenvolvimentos relevantes. A recolha de peças aleatoriamente distribuídas no interior de um recipiente apresenta problemas de complexa resolução, como a determinação da posição e orientação, a oclusão e sobreposição de peças e as variações nas condições de luminosidade.

Uma garra para operações de *bin-picking* é mais do que uma simples ferramenta mecânica para realizar uma determinada tarefa, porque envolve um conjunto de sistemas, que juntos, permitem fazer a interpretação do ambiente de trabalho e a recolha da peça. Em geral, os sistemas existentes recorrem a garras concebidas especialmente para uma aplicação em que os dispositivos de visão e de actuação são um elemento único indissociável.

Este trabalho tem como objectivo principal a concepção de uma unidade que faça a separação dos sistemas de actuação e de percepção da garra. Com isso pretende-se a inclusão de diferentes dispositivos de actuação, mas mantendo fixos os elementos essenciais ao funcionamento do sistema, tornando-o flexível.

A Unidade Geral de Interface (UGI) serve de ligação entre os diversos blocos, permitindo não só o seu controlo mas também o envio de diversa informação sensorial para o sistema remoto. Essa informação pretende atribuir ao sistema as funcionalidades de auto-reconhecimento, segurança e diagnóstico e *feedback* sensorial.

O sistema de visão baseia-se numa configuração de câmara monocular móvel, associado à projecção de luz estruturada e a iluminação localizada. A garra utilizada para demonstração é de actuação pneumática linear e está munida de sensores de distância. A UGI recorre a sensores de ultra-sons para segurança e a *LEDs* de diagnóstico. A comunicação entre os sistemas e a interface remota é por RS-232.

A construção do protótipo demonstrou a flexibilidade e a adaptabilidade esperada, validando o conceito da UGI e da separação funcional do sistema. Deixam-se assim caminhos abertos para a implementação deste conceito em diversas aplicações de *bin-picking*.

Keywords

Industrial Robotics, bin-picking, flexible manipulation, visual servoing.

Abstract

Bin-picking is a problem that only recently has gained notoriety and had some relevant developments. Picking parts randomly distributed inside a bin has some problems very complex to solve, such as the position and orientation, the occlusion and overlapping of parts and variations on lighting conditions.

A gripper for bin-picking operations is more than a simple mechanical tool to perform a certain task, because it implies a group of systems, that together, allow the environment interpretation and to pick the part. In general, the existing systems use especially designed grippers for a certain application, where the vision and gripping devices are the same and inseparable.

The main goal for this work is to design an unit that separates the vision and gripping systems. With that, it is intended to incorporate different gripping devices, but keeping all the essential elements of the system, making it flexible.

The General Interface Unit (GIU) makes the connection between the different blocks, allowing not only its control but also sending sensory information to the remote system. That information intends to assign the features of self-recognition, safety and diagnosis and sensory feedback, to the system.

The vision system is based on a monocular arm-mounted camera, combined with structured light projection and on-board illumination. The gripper used for demonstration has pneumatic activation and is equipped with distance sensors. The GIU uses ultrasonic sensors for safety and LEDs for diagnosis. RS-232 is the communication interface between the systems and the remote interface.

The prototype demonstrated flexibility and adaptability, validating the GIU and functional separation concepts. With that, many paths are opened for applying this concept in several applications of bin-picking.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objectivos	3
1.3	Modos de abordagem	3
1.4	Importância da garra	5
2	Conceito e idealização do protótipo	13
2.1	Princípio de funcionamento	13
2.2	Implementação dos conceitos	15
2.3	Idealização do protótipo	17
3	Projecto mecânico	19
3.1	Seleção de componentes	19
3.2	Dimensionamento da UGI	20
3.3	Dimensionamento da unidade de visão	27
3.4	Interfaces de comunicação e alimentação	28
3.5	Unidade de actuação	29
4	Automação do sistema	31
4.1	Princípio de funcionamento	31
4.2	Desenvolvimento dos sistemas eléctricos	32
4.2.1	Placas de circuito impresso	35
4.3	Desenvolvimento do software de controlo	37
4.3.1	Protocolo de comunicação	37
4.3.2	Microcontroladores	38
4.3.3	Interface de controlo	42
5	Resultados e Conclusões	43
5.1	Aspectos construtivos	43
5.2	Conclusões	47
5.3	Trabalhos futuros	47
A	Amostra de manipuladores	49
B	Simulações numéricas	51
C	Esquemas eléctricos	55

Lista de Figuras

1.1	Diferentes configurações para um sistema de Controlo Realimentado por Visão. . . .	3
1.2	Configuração híbrida utilizada em alguns sistemas de <i>bin-picking</i>	5
1.3	Sistema de <i>bin-picking</i> da Auto/Con Corp..	7
1.4	Sistema de <i>bin-picking</i> desenvolvido pela Fanuc.	8
1.5	Sistema de <i>bin-picking</i> desenvolvido pela JMP, para a TRW Automotive.	9
1.6	Ambiente de trabalho da aplicação da Grundfos (a); Garra desenvolvida pela Scape Technologies (b).	10
2.1	Blocos principais da garra a desenvolver.	14
2.2	Conceito de centralização na UGI.	15
2.3	Configuração transversal (a); Configuração longitudinal (b).	17
3.1	Componentes primários: câmara fotográfica (a), anel de <i>LEDs</i> (b), gerador de luz estruturada (c), servomotor (d).	21
3.2	Tipo de acoplamento: configuração do tipo 1 (a), configuração do tipo 2 (b). . . .	21
3.3	Modularidade no tipo de acoplamento.	22
3.4	Disposição dos componentes primários ao longo da UGI (a); Zona de conexão (b). .	23
3.5	Condições fronteira para a simulação numérica.	24
3.6	Resultados de deformação para a estrutura totalmente em alumínio.	25
3.7	Resultados de deformação para a estrutura híbrida de alumínio e poliamida.	26
3.8	Ajuste longitudinal da câmara (a); Iluminação localizada amovível (b).	27
3.9	Fixação do ponteiro laser e respectivos acessórios de controlo.	28
3.10	Dispositivos de conexão: conector de montagem de painel em cotovelo (a), conector de interface à unidade de actuação (b).	29
3.11	Ponto nulo e zona activa de varrimento para a garra testada.	30
3.12	Gráfico representativo da largura de varrimento em função do alcance.	30
4.1	Funcionamento global do sistema.	32
4.2	Sensor ultrasonico LV-MaxSonar-EZ0 (a), sensor óptico Sharp GP2D12 (b).	34
4.3	Conectores utilizados nas PCBs: conector de placa (a), conector de cabo (b). . . .	36
4.4	Placas de circuito impresso: UGI (a), unidade de actuação (b).	36
4.5	Sistema de fixação da PCB à UGI.	37
4.6	Estrutura do byte n.º 1 da mensagem.	37
4.7	Estrutura do byte n.º2 da mensagem.	38
4.8	Diagrama de fluxo do algoritmo de envio dos microcontroladores.	39
4.9	Diagrama de fluxo do algoritmo de recepção na UGI, por parte do computador remoto. .	40
4.10	Diagrama de fluxo do algoritmo de recepção na UGI, por parte do sistema de actuação. .	41

4.11	Diagrama de fluxo do algoritmo de recepção no sistema de actuação.	41
4.12	Diagrama representativo do funcionamento geral da interface remota.	42
5.1	Fotografia da estrutura da UGI, placas de interface amovíveis e montagem da PCB.	43
5.2	Fotografia da plataforma de ajuste da posição longitudinal da câmara e de fixação do anel de <i>LEDs</i>	44
5.3	Fotografia do sistema de controlo angular do ponteiro laser.	45
5.4	Fotografia da placa de circuito impresso da UGI.	46
5.5	Fotografia da placa de circuito impresso da unidade de actuação.	46
B.1	Diagramas de esforços transversos e de momentos flectores, para as condições de simulação numérica ($w_1 = 166.7 \text{ N/m}$ e $w_2 = 200 \text{ N/m}$).	52
B.2	Resultados da tensão de vonMises para a estrutura totalmente em alumínio.	53
B.3	Resultados do coeficiente de segurança para a estrutura totalmente em alumínio.	53
B.4	Resultados da tensão de vonMises para a estrutura híbrida de alumínio e poliamida.	54
B.5	Resultados do coeficiente de segurança para a estrutura híbrida de alumínio e po- liamida.	54

Lista de Tabelas

3.1	Conjunto de manipuladores cujo acoplamento é do tipo 1 e $\phi_{ext} = 40 \text{ mm}$	22
3.2	Conjunto de manipuladores cujo acoplamento é do tipo 1 e $\phi_{ext} = 50 \text{ mm}$	22
3.3	Tabela comparativa da configuração integral em alumínio com a híbrida de alumínio e poliamida.	26
4.1	Estimativa do consumo máximo de corrente do sistema.	35
4.2	Valores atribuídos a cada um dos campos do byte n.º1.	38
A.1	Amostra de manipuladores estudada.	49
A.2	Repetibilidade dos manipuladores da amostra analisada.	50
B.1	Estimativa de peso para a UGI.	51

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

A utilização de robôs controlados por visão, mais conhecidos por VGR (*Vision-guided robots*), em aplicações estruturadas, tais como a soldadura e a montagem, tem vindo a crescer cada vez mais. Tipicamente, este tipo de aplicações recorre a outros equipamentos responsáveis por posicionar e/ou orientar as peças, antes que estas cheguem ao robô. Assim, cria-se um ambiente estruturado e controlado, permitindo ao sistema de visão um fácil reconhecimento das peças, para o posterior controlo do robô.

No entanto, num ambiente industrial, nem sempre as peças se encontram organizadas de uma forma estruturada. Aliás, numa grande parte dos casos estas saem da linha de produção e são colocadas aleatoriamente no interior de um recipiente. As indústrias que recorrem operações de estampagem e/ou injeção de plásticos são um bom exemplo disso. Geralmente, verifica-se que nesses casos as peças são produzidas a uma determinada cadência e colocadas num recipiente para a criação de stock, de modo a, posteriormente, alimentar a célula seguinte na linha de produção.

Surge então a necessidade da manipulação autónoma de peças em ambientes não estruturados. Actualmente, este tipo de trabalho é feito manualmente por operários ou, em aplicações mais simples, recorrendo a sistemas de automação fixa bastante complexos. Isto resulta em elevados custos de mão-de-obra, em trabalhos de manuseamento repetitivos e perigosos, na introdução de possíveis erros humanos na produção, ou no acréscimo de elevados custos fixos em automação.

Uma pesquisa feita pela Braintech [1] indica que há dez vezes mais oportunidades para a aplicação de sistemas autónomos de manipulação de peças em ambientes não-estruturados, do que recorrendo ao tipo de automação actualmente utilizado na indústria. É neste contexto que aparece o *bin-picking*.

De um modo geral, o *bin-picking* consiste no recurso a VGR's para a recolha autónoma de peças distribuídas aleatoriamente no interior de um recipiente.

À primeira vista, a realização de operações de *bin-picking* pode parecer um problema de fácil resolução uma vez que esta é uma habilidade inerente aos seres humanos. É de realçar que o ser humano possui um sistema sensorial e motor tão complexo e avançado que o torna uma ferramenta de *bin-picking* quase perfeita.

No entanto, este é um problema cuja resolução não é tão trivial como parece. O desenvolvimento desta tecnologia é uma preocupação existente desde o início dos anos 80 e é considerada como sendo o "Santo Graal" das tecnologias de controlo de robôs por visão [1] [4].

Nessa altura, diversas indústrias e laboratórios tentaram desenvolver sistemas de *bin-picking* efi-

cazes, mas todas as tentativas acabaram por fracassar. Estes aperceberam-se que as suas soluções não se adequavam às exigentes aplicações existentes na indústria e, tal como Adil Shafi, presidente da Shafi Inc., refere, "A indústria verificou que isto não era assim tão simples. Havia coisas como a oclusão parcial, a sobreposição de peças e as variações na luminosidade, que realmente dificultaram o progresso do *bin-picking*" [4]. Para além disso, os recursos computacionais e tecnológicos existentes na altura acabaram por ser uma das principais entraves à evolução desta tecnologia.

Apesar deste lento e difícil percurso, depois de mais de vinte anos de desenvolvimentos na área, inúmeros trabalhos têm vindo a ser conduzidos e a problemática do *bin-picking* deixa cada vez mais de parecer incontornável, passando a ser um problema bem definido e estruturado.

O desenvolvimento de um sistema de *bin-picking* eficaz começa essencialmente pela identificação e compreensão dos problemas associados a este tipo de tecnologia. Cada um deles deve ser isolado e tratado como uma variável independente. Assim, a sua resolução torna-se mais directa e eficaz.

Quando nos deparamos com um recipiente que apresenta um determinado número peças no seu interior, mas que se encontram distribuídas aleatoriamente, inúmeras dificuldades aparecem aquando da selecção da melhor peça a recolher.

Em primeiro lugar, é necessário ter em conta que as peças não se encontram posicionadas todas no mesmo plano. À medida que as peças vão sendo retiradas, a profundidade das peças restantes, em relação ao topo do recipiente, é maior. Por outro lado, elas podem encontrar-se orientadas segundo qualquer das três dimensões do recipiente.

Para além da dificuldade associada à determinação da posição e orientação num ambiente a três dimensões, ainda aparecem outras variáveis que fazem da resolução deste problema um grande desafio. Essas variáveis incluem:

- As alterações nas condições de luminosidade e a criação de sombras;
- A sobreposição e oclusão de peças;
- A possibilidade de colisão com outras peças, ferramentas e recipientes;
- A velocidade mínima para a realização das operações;

Todas estas variáveis podem contribuir para a não-recolha da peça, tal como refere Dick Johnson, Material Handling General Manager da Fanuc Robotics America, "Temos que nos preocupar com a colisão com as paredes laterais do recipiente e com o facto de haver suficiente força de preensão na peça, se a peça não estiver no topo com outras peças sobrepostas." Quantas mais peças não forem recolhidas com sucesso, maior é o tempo de ciclo do sistema [4].

Estas dificuldades levaram à origem do *semi-random* ou *semi-structured bin-picking* [1] [4]. Ao tentar criar um ambiente semi-estruturado, em que as peças apresentam geometrias simples, que facilitem o seu reconhecimento ou que pela sua forma natural se auto-orientem no interior do recipiente, a criação de um sistema preciso e eficaz é bastante facilitada. Esta foi a solução encontrada por algumas empresas para introduzir sistemas de *bin-picking* em diversas aplicações da indústria.

No entanto, a criação de um sistema versátil, capaz de recolher com sucesso qualquer tipo de peça e em qualquer circunstância, continua a ser a meta a atingir. Apesar de diversas empresas aclamarem ter desenvolvido sistemas de *random bin-picking*, estes não são sistemas totalmente versáteis. Por exemplo, a recolha de peças como molas, ou peças com geometrias complexas, em que há uma elevada probabilidade de elas se encontrarem entrelaçadas, são candidatos pouco prováveis para aplicações de *bin-picking* a curto prazo.

1.2 Objectivos

Tendo em conta toda a problemática e os desafios associados ao *bin-picking*, este trabalho tem como base a promoção de desenvolvimentos nesta área, procurando a associação de ideias e soluções que permitam ultrapassar os diversos obstáculos inerentes a este tipo de tecnologia.

De um modo geral, com a realização deste trabalho pretende-se o projecto e construção de um protótipo de garra, que sirva de base para a implementação, em aplicações industriais, de sistemas de *bin-picking*.

O projecto da garra procura contemplar, ao máximo possível, toda a problemática associada a este tema, pretendendo a antecipação e a resolução de problemas, aquando do desenvolvimento de sistemas de *bin-picking*.

A sua construção pretende a validação das decisões tomadas *a priori*, bem como a criação de uma ferramenta versátil que permita a realização de trabalhos e desenvolvimentos futuros nesta área.

1.3 Modos de abordagem

Existem diversas maneiras de abordar o problema do *bin-picking*, dependendo cada uma delas das necessidades da aplicação em causa e da geometria das peças.

Actualmente, a maioria das aplicações de *bin-picking* baseia-se em sistemas de Controlo Realimentado por Visão (CRV), em que se recorre a dados visuais adquiridos de uma ou mais câmaras, para controlar o movimento do robô.

Neste tipo de sistemas, a informação pode ser adquirida por uma ou mais câmaras que se encontram montadas directamente no punho do manipulador, por câmaras fixas numa posição estacionária do ambiente de trabalho, ou por combinações híbridas de ambos.

Todos estes sistemas apresentam diferentes técnicas de processamento de imagem, de medição visual e de controlo, sendo cada um deles mais indicado para um determinado tipo de aplicação, uma vez que possuem uma configuração e número de câmaras diferentes. Assim, os sistemas de CRV podem ser diferenciados em três categorias, de acordo com o número e a configuração das câmaras, como se pode ver na figura 1.1 [5].

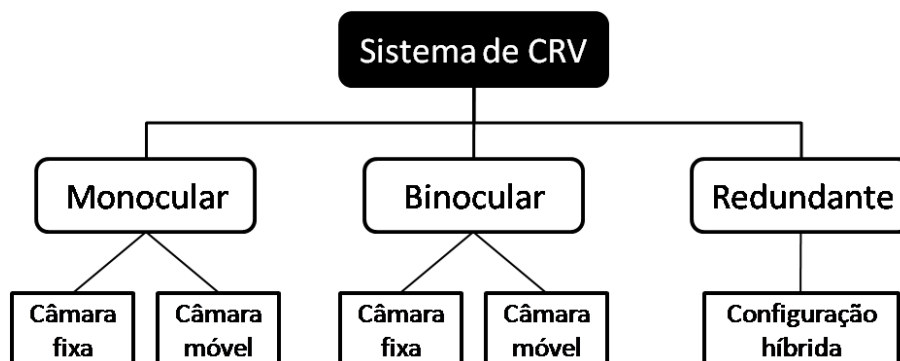


Figura 1.1: Diferentes configurações para um sistema de Controlo Realimentado por Visão.

Sistemas de visão monocular

A nível industrial, os sistemas de visão monocular são bastante utilizados para tarefas simples de posicionamento, uma vez que o uso de uma câmara única minimiza o tempo de processamento necessário para extrair e analisar a informação. No entanto, a perda da informação sobre a profundidade limita o tipo de operações de controlo que podem ser realizadas. Esta é a principal razão para que a utilização destes sistemas para a realização de operações de *bin-picking* seja limitada.

A utilização de uma câmara global fixa é uma solução muito útil e eficaz quando se pretende fazer a recolha de uma peça que se encontra posicionada, ou em movimento simples, num plano. Esta permite facilmente saber a posição relativa do objecto em relação à câmara ou ao robô pela simples análise de uma ou mais imagens capturadas. No entanto, a sua implementação em sistemas de *bin-picking* não é possível. O simples facto de não se poder obter informação a três dimensões do ambiente de trabalho inviabiliza a sua aplicação.

Em alternativa, a utilização de uma câmara móvel montada no punho do manipulador é uma das configurações mais comuns, dado que apresenta uma maior versatilidade em relação à opção da montagem fixa. A principal vantagem deste tipo de sistemas é a possibilidade de fazer a captura da imagem em qualquer ponto dentro da área de trabalho do manipulador. Isso permite a aplicação de uma técnica muito utilizada na recolha de peças, a percepção activa.

Enquanto que o CRV se baseia na constante medição da informação visual capturada para estimar a próxima posição a tomar, a percepção activa consiste numa procura activa no ambiente de trabalho, de possíveis candidatos à recolha de peça. Essa procura é feita iterativamente até que se obtenha informação suficiente para uma possível recolha da peça. Apesar de a percepção activa não se basear apenas em informação obtida a partir de câmaras, a sua implementação em robôs controlados por visão para a recolha de peças é uma abordagem muito utilizada, e o *bin-picking* não é excepção. A manobrabilidade da configuração móvel associada à versatilidade desta técnica, fazem com que a utilização de uma câmara monocular móvel seja tão comum.

Para além disso, a associação de uma câmara móvel à projecção de luz estruturada é outro ponto positivo desta configuração e é uma abordagem também bastante utilizada, principalmente em ambientes a três dimensões.

É de realçar também que um sistema monocular móvel pode facilmente evoluir para um sistema redundante, pela simples adição de uma ou mais câmaras fixas. Esta configuração será abordada mais à frente neste capítulo.

Sistemas de visão estéreo

O recurso a duas câmaras numa disposição estéreo é uma das maneiras para obter uma informação completa a três dimensões do ambiente de trabalho. Uma das abordagens mais utilizadas é determinar a disparidade entre as imagens para depois fazer uma estimativa da profundidade. No entanto, o principal problema desta abordagem é conseguir identificar o mesmo pormenor em ambas as imagens, fazendo a correspondência entre elas [5].

A visão estéreo leva que haja um aumento significativo no tempo computacional por iteração, mas acaba por ser utilizada dado que facilita a determinação da profundidade, sem ser necessário recorrer a modelos explícitos como nos sistemas monoculares [5]. No entanto leva à implementação de algoritmos mais complexos e requer condições de iluminação mais uniformes.

A utilização de câmaras estéreo numa configuração fixa é bastante comum. Com esta tem-se um amplo campo de visão sobre o ambiente de trabalho, permitindo uma visão global da localização das peças e podendo-se fazer a selecção e abordagem à peça com melhores condições de recolha.

Por outro lado, a configuração móvel não é tão utilizada. Apesar de, tal como nos sistemas monoculares, a sua mobilidade atribuir algumas características vantajosas ao sistema e do estéreo facilitar a determinação da profundidade, a *baseline* limitada afecta a exactidão da reconstrução e, consequentemente, a determinação da profundidade [5].

Sistemas redundantes

O uso de sistemas redundantes permite a obtenção mais informação, quando comparado com os sistemas monoculares ou estéreo. No entanto, fazer a correspondência entre diferentes imagens é um problema bastante complexo e que consome bastante tempo de processamento [5]. Por isso este tipo de configuração é pouco usado.

Uma abordagem comum em aplicações de *bin-picking* é um género de configuração redundante, em que se utiliza uma câmara monocular móvel em conjunto com uma ou mais câmaras fixas monoculares ou estéreo, mas sem haver cruzamento simultâneo de informações de ambas (figura 1.2). Este sistema tem como objectivo fazer uma busca geral do ambiente de trabalho com a(s) câmara(s) fixa(s), seleccionando uma peça para ser abordada com a câmara móvel e proceder à recolha. Assim, tira-se partido das vantagens das diferentes configurações.

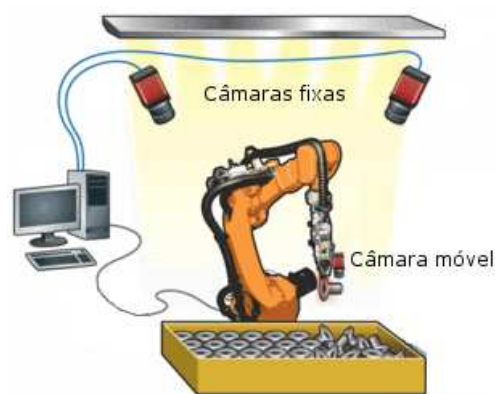


Figura 1.2: Configuração híbrida utilizada em alguns sistemas de *bin-picking*.

1.4 Importância da garra

A garra desempenha um papel importante na automação de sistemas de manuseamento e os VGR's não são excepção. A garra é a interface entre o espaço de trabalho e todo o sistema, permitindo a realização das tarefas pretendidas na aplicação em causa.

Em contraste com os próprios robôs industriais que podem ser programados de modo a adaptarem-se ao ambiente de trabalho, a maioria das garras em aplicações industriais tem que ser alteradas de acordo com o ambiente. Isso acarreta custos muito elevados. Por exemplo, observou-se que o preço de uma única garra pode ser tão alto como 20% do custo total de um manipulador industrial, a qual ainda pode precisar de dispositivos extra para a sua montagem [6].

Geralmente, o desenho de uma garra é uma solução especial e única para uma aplicação em particular, funcionando como uma simples ferramenta mecânica que permite a realização de uma determinada tarefa.

No entanto, num sistema de *bin-picking* a garra tem de ser mais do que isso. Ela desempenha um papel essencial no funcionamento do processo e requer um nível de versatilidade e robustez superior.

A complexidade associada a uma aplicação de *bin-picking* atribui diversos requisitos mínimos à constituição da garra sem os quais a resolução de um problema deste tipo não seria possível. A percepção é o que diferencia uma garra para *bin-picking* de uma outra garra comum.

A implementação de um sistema de percepção pode ser conseguida de diferentes maneiras, recorrendo a diferentes dispositivos como câmaras fotográficas, sensores de distância ou de força, etc.. No entanto, de acordo com o tipo de dispositivos sensoriais utilizados, dois elementos do sistema de percepção podem ser distinguidos: o sistema de visão e o sistema de *feedback* sensorial não-visual. Apesar de fazerem parte da mesma categoria, funcionando para o mesmo fim, a informação adquirida por esses sistemas pode ser diferente e daí a sua distinção. A coexistência desses elementos numa garra de *bin-picking* é essencial ao seu funcionamento.

O sistema de visão vai de encontro à configuração de câmara móvel já descrita anteriormente. A implementação deste tipo de configuração é a melhor maneira de abordar o problema do *bin-picking* e atribui características especiais à garra.

Assim, no seu desenvolvimento, é crucial a inclusão de um sistema de visão robusto e preciso, capaz de satisfazer as necessidades da aplicação. A sua constituição básica é a câmara, que pode ser monocular ou estéreo, mas pode também englobar outros dispositivos, tais como a iluminação a bordo ou a projecção de luz estruturada, os quais contribuem para o seu melhor desempenho.

Os dispositivos de *feedback* sensorial não-visual são de extrema importância quando se pretende fazer a recolha de peças em ambientes não estruturados. São estes que permitem obter informações sobre grandezas que a câmara não pode avaliar, tais como forças, binários e pressões. Estes permitem avaliar não só o ambiente de trabalho, mas também o estado da peça, procurando ultrapassar obstáculos como a sobreposição e oclusão ou classificar a validade da preensão da peça. Apesar do papel que estes dispositivos desempenham no sistema, a sua utilização não é obrigatória, podendo ser facilmente dispensados de acordo com a aplicação.

Uma vez analisada a importância da garra num sistema de *bin-picking* e a sua constituição mínima, é necessário ter em conta que o seu desenvolvimento é um processo complexo e demorado e que requer uma análise detalhada do ambiente em que se vai trabalhar. É essa a metodologia aplicada na maioria dos sistemas desenvolvidos actualmente que procuram isolar e estudar cada uma das especificações da sua aplicação, tentando diminuir o número de variáveis que possam interferir no processo.

Actualmente, existem alguns sistemas de *bin-picking* implementados e cada um deles aborda o problema de um modo diferente. Apesar dos diferentes métodos, existem vários pontos em comum e que são a base de qualquer sistema deste tipo.

A Auto/Con Corp. é uma empresa norte americana de implementação de soluções de automação e desenvolveu um sistema de *bin-picking* para aplicação na indústria automóvel. Este já se encontra implementado em algumas instalações da DaimlerChrysler, desde inícios de 2007 [2]. O objectivo do sistema é fazer a recolha de eixos de um contentor. Para isso ele utiliza duas câmaras Sony XC-HR70, montadas ortogonalmente numa garra personalizada para esta aplicação (figura 1.3).

Esta solução baseia-se numa abordagem por camadas. Em primeiro lugar é feita a aquisição de uma imagem abrangente do contentor, capturando um grupo de peças. Depois uma segunda câmara adquire uma imagem do candidato seleccionado do grupo para posteriormente ser feita a medição visual por um programa que faz o envio de coordenadas para o controlador do manipulador. Finalmente, a garra construída especialmente para a recolha dos eixos tem como função compensar



Figura 1.3: Sistema de *bin-picking* da Auto/Con Corp..

pequenas flutuações no posicionamento das peças.

Embora todo o processamento de imagem e medição visual funcionarem correctamente, o sucesso desta aplicação apenas é conseguido devido à garra. A garra apresenta uma configuração de dois dedos, que ao mesmo tempo que faz a preensão do eixo, empurra-o contra uma cavidade em forma de V. Isso dá uma margem de 10 mm para cada lado do eixo e de 15 mm em altura, garantindo a recolha de 100% das peças.

Apesar da importância que a garra desempenha nesta aplicação, esta não apresenta as características de uma garra de *bin-picking*. Existe um sistema de visão mas faltam dispositivos de *feedback* sensorial não-visual. Isso deve-se ao facto de esta aplicação ser do tipo semi-estruturada, que levou à implementação do *semi random bin-picking*. A geometria que os eixos possuem faz com que estes se auto orientem no interior do recipiente, eliminando algumas variáveis do problema e dispensando a utilização de dispositivos sensoriais.

Esta aplicação apresenta alguns dos princípios básicos do *bin-picking* e é um bom exemplo de uma solução que se adequa perfeitamente ao problema em questão.

A Fanuc também é outro fabricante que tem vindo a desenvolver este tipo de tecnologias. Em 2006 havia cerca de doze sistemas de *bin-picking* da Fanuc já implementados na indústria [4].

Em regra geral, a tecnologia desenvolvida pela marca baseia-se numa câmara fixa montada por cima da área de trabalho, que faz uma busca grosseira, identificando e classificando quinze potenciais peças a serem recolhidas. Em seguida, uma câmara monocular móvel associada a um projector de luz estruturada, faz uma procura mais fina aos candidatos seleccionados. A câmara determina as coordenadas *x* e *y* e o *roll*, enquanto que com o projector laser, montado com um ângulo relativamente à câmara, extrai-se a coordenada *z* e as orientações *pitch* e *yaw*.

Dos quinze candidatos seleccionados o robô aborda a peça mais bem classificada para efectuar a procura mais fina e, se por acaso não houver condições suficientes para a recolha da peça, move-se para o candidato seguinte até haver uma recolha.

Um exemplo das aplicações feitas pela Fanuc é o sistema da figura 1.4, em que é feita a recolha de peças maquinadas. Como se pode verificar na figura 1.4, este é outro tipo de aplicação de *semi random bin-picking*, em que as peças se encontram organizadas de uma maneira semi-estruturada, facilitando a recolha da peça. Apesar disso, pode-se também constatar que a garra é um elemento importante do sistema e é uma solução específica.

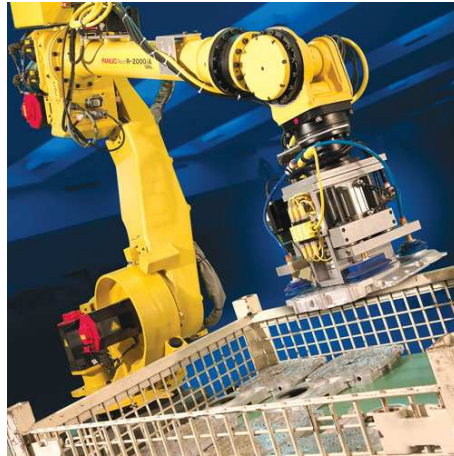


Figura 1.4: Sistema de *bin-picking* desenvolvido pela Fanuc.

Outro sistema que apresenta uma abordagem ligeiramente diferente, também devido à simplicidade da aplicação, é o desenvolvido pela JMP para a TRW Automotive. Estes são destinados a fazer a recolha de discos de travão que saem da fundição em contentores de madeira. Apesar de eles se poderem encontrar em qualquer posição do contentor, a sua forma geométrica orienta-os de uma forma natural segundo a mesma direcção. É aproveitando essa situação que o sistema foi construído.

Uma câmara da Cognex montada no punho do manipulador é utilizada para determinar as coordenadas x e y da peça, enquanto que um sensor de infravermelhos, também localizado no braço, determina a altura a que cada disco se encontra (figura 1.5). Com essa informação é definida uma sequência de recolha, que dá preferência aos discos que se encontram no topo. Antes da recolha de cada peça é capturada uma imagem adicional da peça para garantir que a peça não foi deslocada desde a última operação.

O fabricante optou por fazer uma abordagem muito simples ao problema, determinando pelo sistema de visão apenas as coordenadas x , y e z e baseando-se na garra desenvolvida para compensar variações nas orientações *roll*, *pitch* e *yaw*. Essa garra é de actuação magnética e permite a recolha de discos que apresentem uma inclinação de 20° em relação à horizontal [4].

Este é um óptimo exemplo de uma aplicação de *semi random bin-picking*, em que, apesar de recorrer a um sensor de infravermelhos para a medição de distância, a necessidade de recurso a outros tipos de *feedback* sensorial não-visual não se verifica. Para além disso, a garra tem um papel fundamental, garantindo a recolha da peça e compensando possíveis variações.

Apesar de a maioria das plataformas implementadas corresponderem a ambientes semi-estruturados, existem alguns fabricantes que procuram obter sistemas de *random bin-picking*, procurando desenvolver plataformas mais versáteis e capazes de trabalhar em ambientes mais complicados.

A Scape Technologies é um exemplo do que melhor se faz nesta área. Esta já apresenta diversos sistemas implementados com sucesso em diferentes aplicações industriais. Em 2008 a marca desenvolveu um sistema de *bin-picking* para a Grundfos, um fabricante dinamarquês de



Figura 1.5: Sistema de *bin-picking* desenvolvido pela JMP, para a TRW Automotive.

bombas de água. A aplicação tem como objectivo fazer a recolha dos 2640 casquilhos que se encontram no interior de cada recipiente, como se pode observar na figura 1.6 (a). Inicialmente os casquilhos vem organizados em oito camadas, mas à medida que a recolha vai sendo feita, as peças misturam-se criando um ambiente não estruturado, quer na posição quer na orientação. Há ainda o pormenor de as camadas se encontrarem separadas por uma placa, fazendo com que o robô precise de remove-la para aceder à próxima camada [3]. Este é um ambiente bastante complexo e exigente, sendo um exemplo bastante próximo do chamado *random bin-picking*.

A solução encontrada pela Scape baseia-se num *hardware* relativamente simples para uma orientação precisa do manipulador, junto com um *software* complexo, desenhado para obter informação dinâmica sobre a localização, orientação e manobras padronizadas de abordagem à peça, de modo a aumentar a probabilidade de uma recolha bem sucedida.

O sistema é constituído por duas câmaras fixas no topo do ambiente de trabalho, responsáveis por fazer operações de calibração e por fazer a captura de imagens que dão o posicionamento geral das peças no contentor. Após devida calibração, as duas câmaras capturam um conjunto de imagens que, através de algoritmos de triangulação e localização, permitem a obtenção de informação sobre as peças no contentor. Essa informação é então cruzada com uma base de dados criada a partir de um ficheiro CAD que armazena informação sobre imagens virtuais padronizadas da peça. Isso permite a obtenção da posição e orientação de dez casquilhos que são classificados de acordo com a facilidade da sua recolha [3].

Para além disso, através do modelo CAD da peça e de um programa de treino, o sistema é capaz de gerar uma base de dados com quinze modos de abordagem à peça diferentes. Acrescentando esta informação ao processo a recolha é feita mais rapidamente, dado que se parte de trajectórias pré-definidas, baseando-se em localizações, orientações e características comuns das peças.

Entretanto, o protagonismo é todo dado à garra, denominada de *Tool-Unit*. Esta é uma

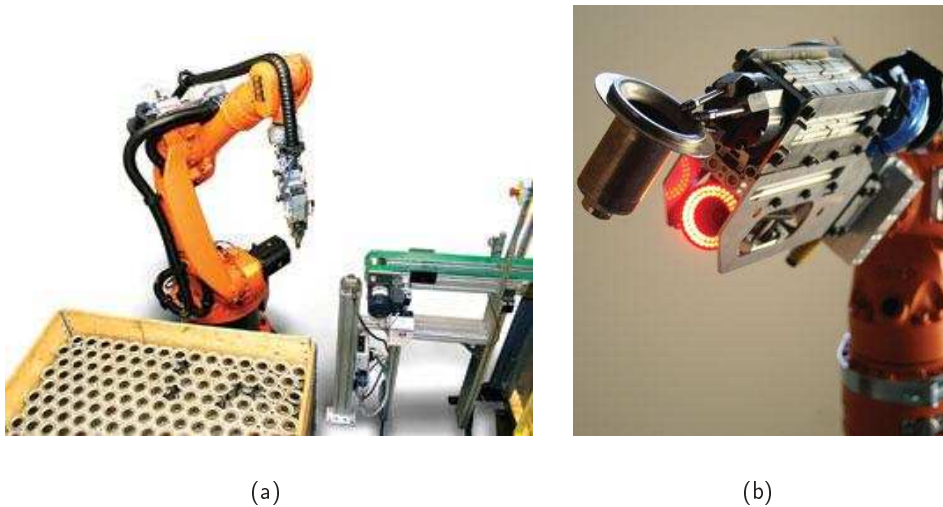


Figura 1.6: Ambiente de trabalho da aplicação da Grundfos (a); Garra desenvolvida pela Scape Technologies (b).

plataforma modular, que contém uma câmara FireWire com um lente grande-angular de filtro vermelho e um anel de *LED's* de cor vermelha para iluminação a bordo. Nesta aplicação em particular não se recorre à projecção de luz estruturada, no entanto a Scape possui outros sistemas que usam este tipo de abordagem. Esta unidade tem a particularidade de permitir a inclusão de diferentes tipos actuação, incluindo a garra de três dedos usada na Grundfos (figura 1.6 (b)).

Após feita a selecção dos candidatos à recolha, o robô move a *Tool-Unit* para uma localização próxima da peça seleccionada de modo a capturar uma imagem com a câmara móvel. Com ela é feita a verificação da posição e orientação da peça, bem como a possibilidade de a apanhar. Caso não seja possível, o manipulador movimenta-se para o candidato seguinte na lista de classificação.

Segundo Asim Ikram, gestor de projecto da Scape Technologies, "Os resultados da verificação da câmara móvel são muito precisos devido à curta distância de captura e à luminosidade controlada, graças ao anel de *LED's* vermelho e ao filtro vermelho da câmara." [3].

O tempo de ciclo médio desta aplicação é de 7,6 segundos e é capaz de recolher quase 100% das peças, sobrando no máximo quatro no fim do contentor.

A maneira como o sistema se encontra desenvolvido demonstra a necessidade que a Scape teve em criar uma plataforma versátil e facilmente adaptável a diferentes ambientes. Tanto a nível de *hardware* como a nível de *software*, em que várias unidades com funcionalidades diferentes convergem para um processo de recolha da peça rápido e eficaz, vê-se que a concepção do sistema foi feita tendo em conta a abordagem a diferentes tipos de aplicações, em ambientes não-estruturados.

Embora a garra concebida pela Scape Technologies apresente o conceito de modularidade e possua um sistema de visão bastante completo, ela não se encontra preparada para incorporar dispositivos de *feedback* sensorial não-visual. Mesmo que se encontre orientada para ambientes não-estruturados, a existência desses dispositivos seria essencial se se pretendesse fazer a recolha de peças com geometrias mais complexas, e até propícias a entrelaçarem-se. Apesar disso, a criação deste sistema é um grande desenvolvimento na área e é bastante propenso a evoluções que permitam abordar aplicações ainda mais complexas.

No que diz respeito à garra, verifica-se que a abordagem mais utilizada é a opção da câmara

monocular móvel, podendo estar associada a outros elementos. Em regra geral os sistemas apresentam todos sistemas de visão robustos e adequados à aplicação a que se destinam. À excepção da solução da Scape Technologies, a parte de actuação e de visão são um elemento único e concebidos apenas para aquela aplicação.

O ponto em comum entre as diversas aplicações de *bin-picking* é a inexistência do *feedback* sensorial não-visual. Todos se baseiam na informação visual para contornar problemas como a sobreposição e oclusão de peças, o que nestas aplicações é o mais indicado. No entanto, obter informações sobre a força exercida ou a pressão de aperto na garra por exemplo, seria um ponto fundamental para recolher peças mais complexas e que apresentem uma massa superior. O recurso a dispositivos sensoriais para efectuar o controlo de força é algo que se verifica em alguns sistemas de montagem de peças não-autónomos, em que é necessário fazer o encaixe controlado de peças, mas a sua aplicação em sistemas de *bin-picking* não é uma realidade actual. A sua implementação seria uma mais valia para qualquer sistema que pretenda abordar um ambiente de *random bin-picking*.

Portanto, a criação de um sistema de *bin-picking* totalmente aleatório e capaz de recolher vários tipos de peças com geometrias complexas ainda não se verificou, mas continua a ser a meta a atingir. Tendo em conta o rápido crescimento que esta tecnologia teve nos últimos anos, esse objectivo não estará longe e o desenvolvimento deste trabalho vai de encontro a esse objectivo. Pretende-se dar um contributo nesta área de modo a que o *bin-picking* deixe cada vez mais de ser o "Santo Graal" das tecnologias de controlo de robôs por visão.

Capítulo 2

Conceito e idealização do protótipo

Uma das principais preocupações aquando do desenvolvimento de sistemas de *bin-picking* está relacionada com os custos associados a este tipo de plataformas.

Tendo em conta que o número de aplicações em que um sistema de *bin-picking* pode ser implementado é considerável, o desenvolvimento de um sistema diferente para cada aplicação implicaria custos elevadíssimos. Portanto, é essencial o projecto de um sistema flexível, em que, com poucas alterações este se consiga adaptar a diferentes aplicações. A procura de sistemas com estas características tem sido preferida em detrimento da automação fixa, principalmente em indústrias que apresentem uma diversidade e variabilidade de produtos bastante elevada.

É neste contexto que se fundamenta toda a idealização deste protótipo. Partindo dos conceitos de versatilidade e robustez, pretende-se a criação de uma plataforma que satisfaça as necessidades de flexibilidade e adaptabilidade requeridas pelos exigentes ambientes industriais.

É também com este conceito de versatilidade que se procura a resolução e antecipação dos diversos problemas associados ao *bin-picking*.

Geralmente, o desenvolvimento de um sistema extremamente flexível resulta também na redução da fiabilidade e robustez do mesmo. No entanto, essa é outra das principais preocupações na idealização deste protótipo. Procura-se obter um compromisso entre estes conceitos, garantindo a funcionalidade do sistema em qualquer uma das especificações a que este se encontrar destinado.

2.1 Princípio de funcionamento

No desenvolvimento deste protótipo pretende-se garantir a funcionalidade do sistema pela divisão dos seus componentes funcionais em unidades independentes, tentando no entanto minimizar essa dependência. Assim, não se comprometerá a operação geral do conjunto, e obter-se-á a tão esperada flexibilidade do sistema.

Tendo em conta a constituição básica de uma garra para operações de *bin-picking*, verificou-se que os sistemas de visão e de actuação são os componentes fundamentais da plataforma e o funcionamento do sistema de *bin-picking* apenas é possível se ambos funcionarem em conjunto.

No entanto, dado que se pretende a criação de um protótipo flexível, a dissociação de ambos é imperativa. É nesta separação que se baseia o conceito geral para o funcionamento do sistema, dado que ao separar as funcionalidades de visão e de actuação, em plataformas independentes, está-se a criar a possibilidade de ter um sistema de visão fixo no punho do manipulador, mas que pode interagir com diferentes tipos de actuação.

Uma plataforma deste tipo abre novas portas para a implementação de soluções de *bin-picking*

em diversas aplicações uma vez que, garantindo que o sistema de percepção seja robusto e funcione correctamente, o sistema se pode adaptar a uma diferente aplicação apenas pela simples colocação do elemento de manipulação que melhor se adequar.

Porém, a separação destes dois sistemas não é tão simples. Para além da independência física, é necessário garantir que, independentemente do sistema de actuação acoplado, o conjunto funcione correctamente. Isso é conseguido recorrendo a uma unidade central, responsável por fazer a ligação entre os elementos e garantindo a estabilidade e funcionalidade do sistema. Na figura 2.1 pode-se ver o funcionamento geral da plataforma, com a unidade central, as unidades independentes e o relacionamento entre elas.

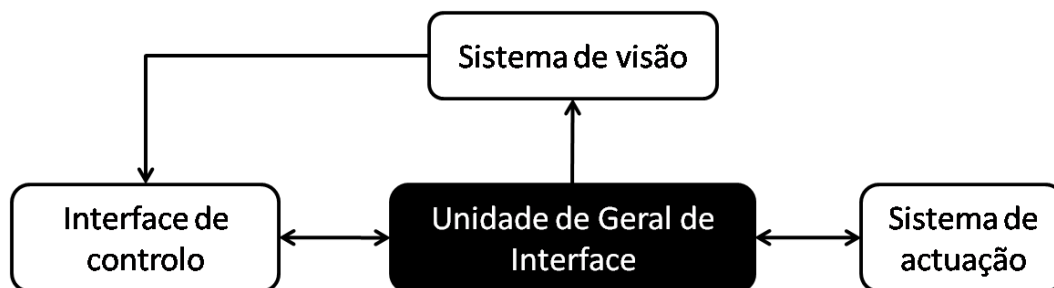


Figura 2.1: Blocos principais da garra a desenvolver.

Este princípio de funcionamento baseia-se numa unidade central, a Unidade de Geral de Interface (UGI). A sua principal função é fazer a conexão entre os sistemas independentes, permitindo uma maior flexibilidade do sistema. No entanto, não se pretende que esta seja apenas uma ponte de ligação, mas sim o elemento mais importante da plataforma. Toda a conceptualização e idealização do protótipo gira em torno dela.

Tenciona-se que a UGI seja um elemento físico onde as unidades independentes são acopladas e capaz de desempenhar diversas funções, permitindo a inclusão de outros elementos que contribuam para um melhor funcionamento do sistema. Este conceito encontra-se representado na figura 2.2 na qual se demonstra os diferentes elementos possíveis de acrescentar ao sistema, bem como as funcionalidades globais que a UGI deverá ser capaz de desempenhar.

A inclusão de diferentes elementos no sistema tem dois objectivos principais, nomeadamente, a possibilidade de acrescentar componentes sensoriais ao sistema e de garantir a sua segurança e a do ambiente que o rodeia. Por sua vez, pretende-se que a adição de elementos sensoriais possa ser feita em duas circunstâncias diferentes, indo ao encontro do conceito de independência do sistema de actuação. Para isso, dividiu-se a informação sensorial em duas categorias: sensores intrínsecos e sensores extrínsecos (figura 2.2).

O conjunto de sensores intrínsecos corresponde aos dispositivos que se encontram directamente ligados à UGI. A principal funcionalidade destes elementos é a obtenção de dados sensoriais que sirvam de protecção, não só à unidade central, mas também aos elementos ligados. Assim, pode-se monitorizar a interacção do sistema com o ambiente de trabalho, protegendo os elementos mais sensíveis.

A informação sensorial extrínseca apresenta uma grande importância para o funcionamento do sistema de *bin-picking*, uma vez que esta corresponde aos dados sensoriais adquiridos por dispositivos exteriores à UGI. A principal função destes dispositivos é dar um *feedback* constante sobre a interacção da unidade de actuação com o ambiente de trabalho e a peça a recolher. Assim, e numa linha de redundância sensorial, pretende-se corroborar a informação obtida pela(s)

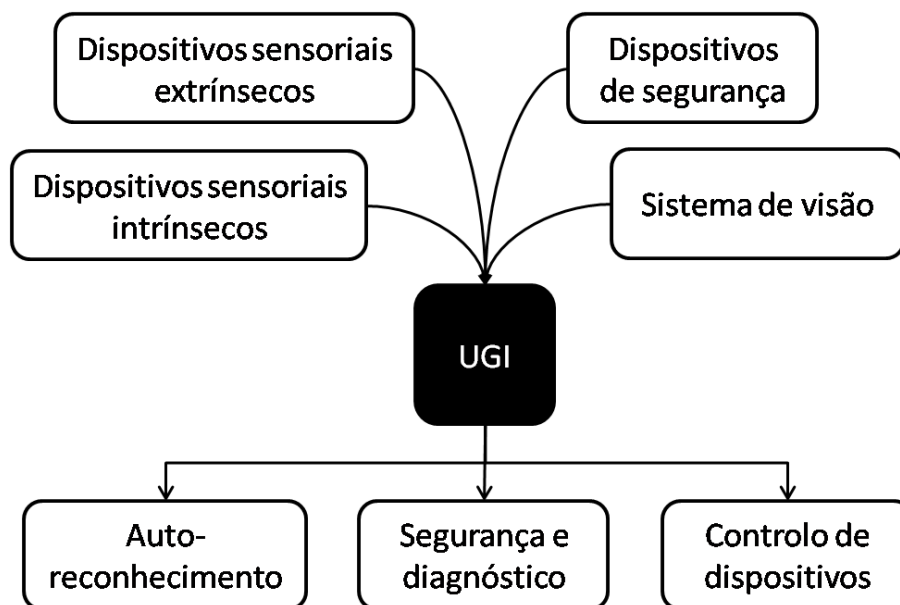


Figura 2.2: Conceito de centralização na UGI.

câmara(s), com a informação obtida pelos diversos sensores extrínsecos.

A utilização destes dispositivos têm como objectivo atribuir algumas funcionalidades à UGI que parecem ser importantes ao sistema.

O auto-reconhecimento é uma característica fundamental quando se pretende conceber um sistema de acoplamento flexível. Com esta facilidade pretende-se que a UGI seja capaz de detectar automaticamente o tipo de sistema de actuação. Assim, o processo de adaptação a uma aplicação diferente fica bastante facilitado.

A funcionalidade de segurança e diagnóstico não é essencial ao sistema, mas é uma característica que se pensa ser uma mais valia para o projecto. O objectivo é que a unidade central faça o auto-diagnóstico dos diferentes estados do sistema, permitindo ao utilizador uma fácil detecção de possíveis avarias e do estado geral do sistema.

Deseja-se ainda que a plataforma contribua significativamente para um aumento geral da segurança do sistema. Através dos dispositivos sensoriais intrínsecos torna-se possível fazer, por exemplo, paragens de emergência em risco de colisão, ou o processamento dessa informação para auxílio no processo de abordagem à peça.

Finalmente, através de uma interface de controlo, a UGI deve permitir o comando de possíveis mecanismos e dispositivos existentes em qualquer uma das unidades do sistema.

2.2 Implementação dos conceitos

Uma vez definidos os conceitos gerais para a idealização do protótipo e suas principais funcionalidades, resta definir como é que estes serão aplicados neste sistema em particular.

O primeiro passo para o projecto do protótipo é a definição da unidade de visão. Devido à sua flexibilidade optou-se pela utilização de um sistema monocular móvel, associado à projecção de luz estruturada. Esta configuração é aquela que apresenta maior versatilidade, dado que permite a implementação de diversos tipos de algoritmos. Para além disso, esta ainda é a configuração mais

comum e a utilizada pelas aplicações que apresentam melhores resultados.

É ainda de realçar que, desta maneira, o sistema pode facilmente evoluir para uma configuração redundante pela simples adição de uma ou mais câmaras fixas. Assim, o leque de possíveis abordagens ao problema aumenta e o número e tipo de aplicações também. Com esta arquitectura garante-se o funcionamento mínimo do Controlo Realimentado por Visão e é o primeiro passo para a determinação da posição e orientação da peça.

De modo a contribuir para um melhor funcionamento do sistema surgiu ainda a ideia de controlar o ângulo de projecção da luz estruturada. Isso permite, não só a projecção do feixe na direcção que for mais conveniente, mas também a realização de operações de varrimento na área de trabalho.

Entretanto, aparece o problema da alteração das condições de luminosidade e da criação de sombras. Esse é um dos principais factores que levam a falhas do processo de medição visual e originam uma possível não-recolha da peça. Dada a configuração móvel do sistema, a solução encontrada para o problema é o recurso a iluminação localizada. Com a colocação de iluminação em redor da câmara, criando condições de iluminação uniformes, prevê-se que o processo de captura de imagem seja menos propenso a variações.

Em seguida procede-se à materialização da Unidade de Geral de Interface. Tendo em conta todas as funcionalidades de que ela será responsável, esta é provavelmente o elemento mais complexo de todo o sistema e contempla o desenvolvimento de soluções em diferentes áreas da engenharia.

Fisicamente, ela tem que servir de ligação a quase todos os elementos do sistema, e para que o seu projecto vá de encontro ao conceito de flexibilidade, pretende-se que o maior número possível de acoplamentos seja normalizado. Essas ligações incluem o acoplamento do manipulador, o do sistema de visão e o do de actuação. Portanto, o seu projecto deve ter em conta que esta deve permitir a sua aplicação em diversos manipuladores de fabricantes diferentes, de uma maneira simples e prática. Por outro lado, a plataforma também tem que ser robusta. É necessário garantir que todas as suas interfaces com dispositivos exteriores sejam fiáveis e robustas. Essas interfaces incluem:

- Transferência de dados (sistema de actuação e computador remoto);
- Fornecimento de tensão para alimentação;
- Fornecimento de ar comprimido;

Cada uma destas interfaces é extremamente importante e a falha de uma delas implica a quebra geral no funcionamento do sistema. Torna-se então essencial que os componentes responsáveis por essas interfaces sejam robustos e que a sua colocação na UGI permita um fácil acesso e não condicione os movimentos do manipulador.

Outro factor a ter em conta é a colocação de toda a electrónica na UGI. Por um lado, é imperativo que esta se encontre isolada do exterior, uma vez que é um dos elementos mais frágeis do conjunto. Por outro lado, a sua disposição também deve possibilitar o fácil manuseamento dos seus componentes, dado que esta vai ser responsável por controlar e/ou comunicar com diversos dispositivos exteriores à UGI. Torna-se então necessário obter um compromisso entre o isolamento dos componentes electrónicos e a acessibilidade a estes, sem comprometer a rigidez da estrutura.

Finalmente, e tendo em conta que o principal objectivo desta plataforma é permitir o acoplamento de diferentes garras, que podem ter tipos de actuação e elementos sensoriais diferentes, é necessário garantir que estas se encontram munidas dos elementos mínimos para que a comunicação com o sistema seja possível. É através dessa comunicação que a UGI sabe qual o tipo de garra e os sensores que se encontram acoplados.

Portanto, para que o conjunto funcione devidamente, é necessário garantir que a garra a utilizar se encontra munida de uma interface de comunicação com a UGI, seguindo um protocolo comum.

Para além disso, e porque existem diversas garras no mercado com modos de acoplamento diferentes, pode ser necessária uma adaptação do acoplamento para a ligação à UGI.

2.3 Idealização do protótipo

No processo de idealização do protótipo duas configurações gerais surgiram. Cada uma delas engloba os conceitos já definidos, mas materializa-os de maneira diferente.

A principal diferença entre ambas as abordagens está relacionada com a orientação da estrutura principal do sistema. Na figura 2.3 pode-se ver os esboços das duas configurações para o protótipo.

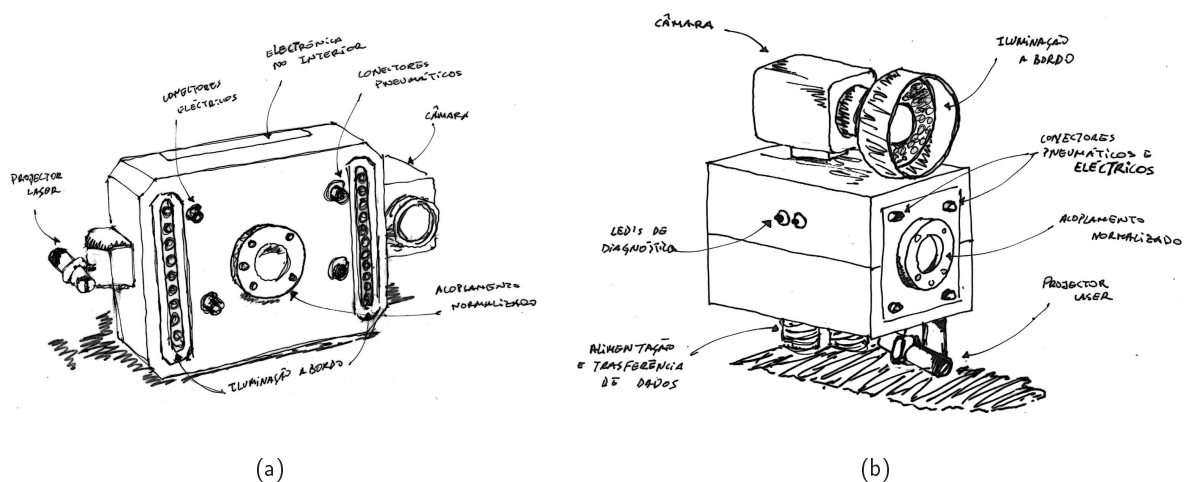


Figura 2.3: Configuração transversal (a); Configuração longitudinal (b).

O esboço da figura 2.3 (a) baseia-se numa configuração transversal, em que os componentes se encontram distribuídos segundo a direcção normal ao eixo principal do manipulador.

Este protótipo contempla a câmara e o ponteiro laser em ambas as extremidades da estrutura. Na frente encontram-se os conectores eléctricos e pneumáticos de alimentação da garra, onde esta também é acoplada. Ainda na frente se encontra a iluminação a bordo, baseada em matrizes de LEDs.

Toda a cablagem de alimentação e transferência de dados é feita na face posterior da estrutura e a electrónica encontra-se no seu interior.

Em alternativa, aparece a configuração longitudinal da figura 2.3 (b). Neste modelo a construção é feita segundo o eixo principal do manipulador, dando origem a um protótipo mais esguio. A câmara encontra-se no topo da estrutura, associada a um anel de LEDs concêntrico com o seu eixo. Na face inferior está o ponteiro laser e o respectivo servomotor de controlo, havendo ainda uma zona de acoplamento de conectores eléctricos e pneumáticos. Estes têm a função de alimentar o sistema e permitir a transferência de dados com a interface remota.

O acoplamento ao manipulador é feito na parte posterior e o da garra na face frontal. Os conectores pneumáticos e eléctricos de alimentação da garra também se encontram na zona frontal.

Nas paredes laterais podem-se ainda acrescentar LEDs de diagnóstico bem como alguns dispositivos sensoriais.

Cada um destes modelos apresenta vantagens e desvantagens e é com base nestas que será seleccionado aquele que melhor satisfaz as necessidades do projecto.

A grande vantagem da configuração transversal é a sua grande superfície frontal, que permite a inclusão de diversos componentes e atribui uma maior liberdade no acoplamento da garra. Para além disso, esta apresenta uma maior rigidez, quando comparado com a versão longitudinal, sendo menos propícia à flexão. Este é um factor bastante importante, dado que possíveis deformações são indesejáveis, de modo a garantir a repetibilidade do robô.

No entanto, o que se ganha em rigidez perde-se em manobrabilidade. As grandes dimensões na direcção transversal deste modelo, restringem a liberdade de movimentos do manipulador na abordagem a um recipiente com peças. Isso é mais notório em aplicações em que se recorre a robôs de baixo e médio *payload*, já que nestes a volumetria da estrutura é mais acentuada em relação às dimensões do manipulador. Por outro lado, se se pretende recorrer a robôs de alto *payload* para recolher peças de grandes dimensões e com elevados pesos, esta configuração é preferível, uma vez que volumetria da estrutura deixa de ser um problema e a rigidez é um factor importante na sua concepção.

Para além disso, as reduzidas paredes laterais deste esquisso também podem ser uma limitação, principalmente na colocação da câmara que pode ser de grandes dimensões.

No lado oposto aparece a configuração longitudinal, em que as desvantagens do modelo transversal acabam por ser as suas vantagens e vice-versa. O seu desenho esguio atribui uma maior manobrabilidade ao sistema e dá uma maior superfície às faces superior, inferior e laterais. Isso facilita a colocação de componentes e dá uma maior liberdade para melhorar o sistema. Pode-se, por exemplo, ajustar a posição longitudinal da câmara ou acrescentar dispositivos sensoriais.

Com esta estrutura obtém-se ainda um maior volume no seu interior para a colocação de elementos electrónicos e/ou pneumáticos.

Mas ao criar um modelo mais longo e estreito, reduz-se as superfícies posterior e frontal da estrutura. Isso reduz a liberdade de acoplamento e a colocação de conectores. Para além disso, origina-se também uma estrutura mais propensa à flexão, o que, aliás, pode não ser um problema no sistema em projecto. Tendo em conta que se pretende criar um sistema direccionado a recolher peças de pequenas dimensões e de baixo peso, recorrendo a manipuladores de baixo e médio *payload*, esse problema poderá nem afectar a estrutura, principalmente se o seu projecto for feito tendo isso em conta.

Assim, tendo em conta o sistema que se pretende construir e o balanço entre as vantagens e desvantagens de ambos os modelos, a configuração que melhor se adequa às especificações do projecto é a longitudinal. A maior manobrabilidade e a maior facilidade para a colocação de componentes são factores essenciais no projecto de um sistema de *bin-picking* e levaram à escolha desta configuração para a construção do protótipo.

Capítulo 3

Projecto mecânico

Partindo dos conceitos e do modelo idealizado no capítulo anterior, estão garantidos os requisitos mínimos para se proceder à materialização do protótipo. Procede-se então ao projecto todo o *hardware* e respectivos meios de acoplamento, de modo a reproduzir da melhor maneira possível os conceitos e objectivos definidos para o protótipo.

3.1 Selecção de componentes

A selecção de componentes é um processo bastante lento e trabalhoso, mas extremamente importante aquando do projecto de qualquer tipo de sistema. Esta é a primeira etapa a ser realizada antes de ser feita a modelação de qualquer parte do modelo, pois alguns deles afectam o dimensionamento geral da estrutura. Para além disso qualquer componente apresenta um tipo de acoplamento particular e que tem que ser contemplado no projecto do protótipo.

Portanto, é necessária a selecção dos componentes primários do sistema, já que estes são essenciais ao seu funcionamento e podem, de algum modo, condicionar o dimensionamento global do protótipo. Os componentes primários são basicamente os elementos constituintes do sistema de visão e, à excepção do servomotor, todos estes já se encontravam no Laboratório de Automação e Robótica da Universidade de Aveiro, acabando por se adequar às especificações do sistema.

Os componentes secundários apenas contribuem para um melhor desempenho do sistema e serão descritos à medida que o projecto mecânico do protótipo for sendo apresentado.

Câmara fotográfica

A câmara fotográfica utilizada é a JAI PULNiX TMC-1327GE (figura 3.1 (a)) e apresenta características bastante boas que permitem o seu uso neste tipo de aplicações.

Esta é uma câmara com CCD de captação progressiva de alta-velocidade e uma *frame rate* de 30 *fps*. A imagem capturada é a cores, com uma resolução de 1392×1040 pixels activos, o que dá uma boa qualidade de imagem, e possui pixels quadrados de dimensão $6.45 \times 6.45 \mu m$, para uma medição dimensional precisa. A transferência de dados pode ser feita por Gigabit Ethernet, para grande taxas de transferência de dados.

A câmara tem uma volumetria relativamente grande ($50.8 \times 50.8 \times 83.5 \text{ mm}$) e uma massa de 140 g, o que significa que ao dimensionar o protótipo para esta câmara a inclusão de outras com dimensões mais reduzidas é possível.

Anel de LEDs

O anel de LEDs acaba por ser a melhor opção para iluminação localizada nesta configuração. Ao ter um anel concêntrico com o eixo da câmara obtêm-se condições de iluminação uniformes ao seu redor.

O anel utilizado (figura 3.1 (b)) é de LEDs de cor branca e com uma grande intensidade de saída. O seu invólucro é feito numa liga de alumínio e as suas dimensões ($\phi 72 \times 26 \text{ mm}$) adequam-se à câmara utilizada.

Ponteiro laser

O ponteiro laser escolhido para o sistema é um gerador de padrões de luz estruturada da StockerYale, e permite a projecção de vários padrões pela simples troca da sua cabeça óptica (figura 3.1 (c)). O ponteiro tem uma potência de 1 a 200 *mW* e um comprimento de onda de 635 a 1550 *nm*. A intensidade do padrão é bastante uniforme e possui um bom alcance. Apresenta uma configuração cilíndrica com diâmetro de 19 *mm* e, dependendo da lente, o seu comprimento varia entre 72 e 100 *mm*. A sua massa é de 65 *g* e a sua cobertura é em alumínio anodizado a preto.

Todas estas características fazem com que este se adequue, tanto funcional como dimensionalmente, ao sistema em desenvolvimento.

Servomotor

A função deste servomotor é o controlo da orientação de projecção do ponteiro laser. Para o seu dimensionamento, considerou-se que o peso total do ponteiro se encontrava uniformemente distribuído ao longo do seu comprimento e que uma das extremidades se encontrava fixa no eixo de rotação do servo. Sabendo que o peso do conjunto (*p*) ronda os 0.1 *kgf* e que o seu comprimento máximo (*l*) é de 100 *mm*, pela expressão 3.1 obtém-se o binário mínimo (*M*) do servomotor:

$$M = \frac{p \cdot l^2}{2l} = \frac{0.10 \times 10}{2} = 0.5 \text{ kgf} \cdot \text{cm} \quad (3.1)$$

Tendo em conta o baixo binário do servomotor, os critérios de selecção mais significativos são apenas as dimensões e o seu custo. Por isso, optou-se por seleccionar o servo digital MG16R da TowerPro (figura 3.1 (d)), que associa um binário de 2.7 *kgf.cm* a dimensões reduzidas e a um baixo custo. Para além disso este possui engrenagens metálicas, o que dá uma maior robustez ao sistema.

3.2 Dimensionamento da UGI

Para a determinação das dimensões mínimas da UGI começou-se por recolher uma amostra considerável de manipuladores robóticos existentes no mercado. A partir desta amostra pretende-se fazer uma selecção de grupos de manipuladores que apresentem o mesmo esquema de acoplamento.

A recolha da amostra dos manipuladores foi feita tendo em conta o tipo de aplicação a que este sistema se encontra destinado, seleccionando apenas manipuladores de baixo e médio *payload*. Esta amostra é constituída por um total de vinte e três modelos, de quatro marcas diferentes (tabela A.1 em apêndice).

Através da amostra seleccionada verificou-se a existência de dois sistemas de acoplamento predominantes: a configuração do tipo 1 (figura 3.2 (a)) e a do tipo 2 (figura 3.2 (b)). Apesar de



(a)



(b)



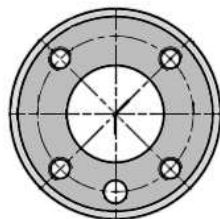
(c)



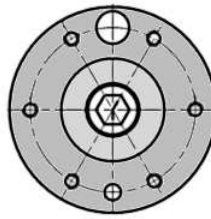
(d)

Figura 3.1: Componentes primários: câmara fotográfica (a), anel de LEDs (b), gerador de luz estruturada (c), servomotor (d).

os manipuladores apresentarem um destes acoplamentos, dentro de cada configuração podem ainda haver dimensões diferentes, de acordo com o *payload* do robô. É com base no tipo e dimensão do acoplamento que se seleccionaram os grupos mais significativos de manipuladores.



(a)



(b)

Figura 3.2: Tipo de acoplamento: configuração do tipo 1 (a), configuração do tipo 2 (b).

O primeiro grupo é constituído pelos modelos da tabela 3.1 e representa 26% da amostra total. Este conjunto possui o acoplamento do tipo 1, com um diâmetro exterior de 40 *mm*.

O segundo grupo seleccionado engloba os modelos da tabela 3.2, constitui 30% do conjunto total e apresenta o acoplamento do tipo 1, com diâmetro exterior de 50 *mm*.

Nos restantes manipuladores da amostra verificou-se uma grande disparidade, impedindo a criação de grupos significativos, com acoplamentos em comum.

Tabela 3.1: Conjunto de manipuladores cujo acoplamento é do tipo 1 e $\phi_{ext} = 40 \text{ mm}$.

Marca	Modelo
Fanuc	ARC Mate 50iC/5L
	LR Mate200iC Series w R-30iA
Staubli	TX40
	TX60/TX60L
Motoman	HP3L
	HP3XF/HP5

Tabela 3.2: Conjunto de manipuladores cujo acoplamento é do tipo 1 e $\phi_{ext} = 50 \text{ mm}$.

Marca	Modelo
Fanuc	ARC Mate 100iBe
Staubli	RX130
Motoman	HP6S
	HP20/HP20-6
ABB	IRB 140
	IRB 1410
	IRB 1600-6/IRB 1600-8

Assim, e dado que se pretende construir um sistema versátil e que possa ser aplicado ao maior número de manipuladores possível, pode-se concluir através desta análise, que o dimensionamento da UGI deve ser feito de modo a que possa englobar, pelo menos, o acoplamento do tipo 1 com os diâmetros exteriores de 40 e 50 *mm*.

A solução encontrada para permitir esta variabilidade no tipo de acoplamentos foi a concepção de uma plataforma modular, em que as zonas de acoplamento são placas de interface amovíveis, conforme ilustrado na figura 3.3.

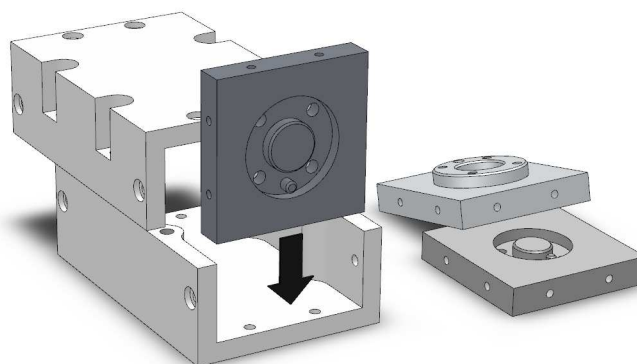


Figura 3.3: Modularidade no tipo de acoplamento.

De modo a garantir a implementação dos dois acoplamentos seleccionados, definiu-se que as placas amovíveis teriam um formato quadrangular, com 80 *mm* de lado. Para além disso, e

transpondo este conceito para a interface do sistema de actuação, torna-se possível acoplar uma vasta gama de garras à UGI, pela simples adaptação da placa amovível.

Uma vez definidos os meios de acoplamento, é necessário dimensionar o corpo da UGI. Os aspectos mais críticos no seu dimensionamento são a colocação da câmara e do anel de *LEDs*, pois apresentam uma grande volumetria. Tendo em conta que, em conjunto, a câmara e o anel têm um comprimento de aproximadamente 130 *mm*, estabeleceu-se que o comprimento da UGI seria de 150 *mm*. Com isso garante-se a colocação dos diversos componentes, bem como o espaço no interior da UGI para a colocação de electrónica. Na figura 3.4 (a) pode-se ver a disposição geral dos componentes primários ao longo do corpo da UGI, em que a câmara e o anel de *LEDs* se encontram no topo da estrutura, e o ponteiro laser, com os acessórios de controlo, na base.

Tendo ainda em atenção que a inclusão de conectores eléctricos e pneumáticos é fundamental, definiu-se uma zona de conexão na base da UGI (figura 3.4 (b)), a qual é usada única e exclusivamente para esse fim. Nessa zona, a parede da estrutura apresenta uma espessura menor, de modo a permitir o acoplamento de conectores do tipo "passa-muro" .

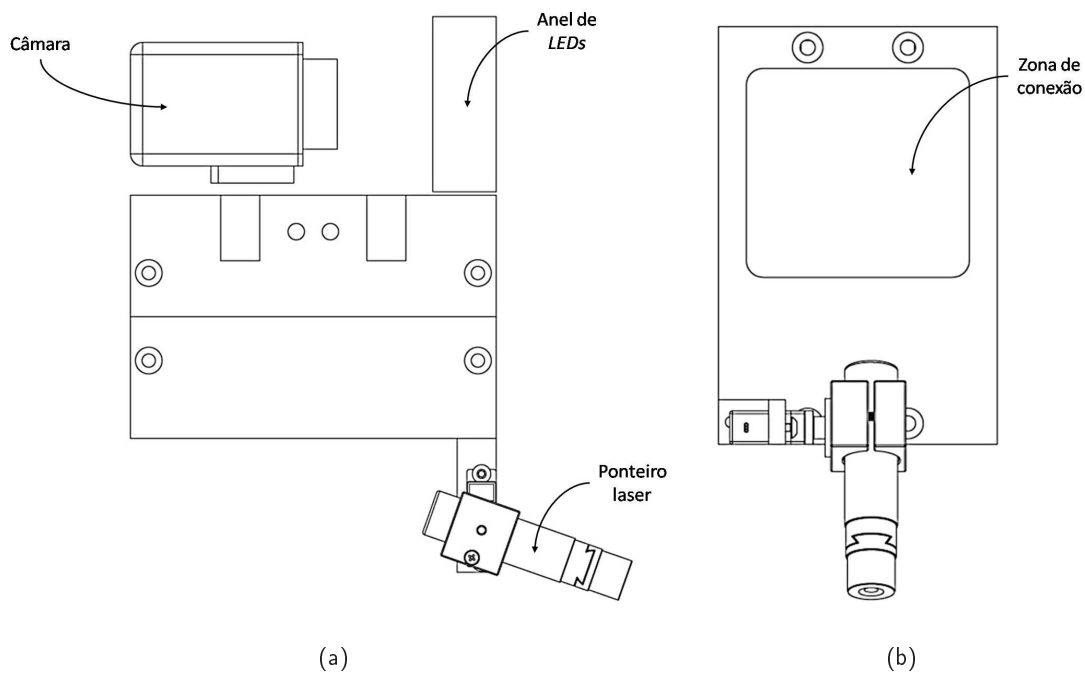


Figura 3.4: Disposição dos componentes primários ao longo da UGI (a); Zona de conexão (b).

Indo ao encontro da solução das placas amovíveis, o corpo da UGI é constituído por duas estruturas em forma de U, que permitem a fácil montagem do conjunto (figura 3.3). As duas são fixas entre si e às placas por parafusos, garantindo que, em conjunto, as quatro partes da UGI funcionam como uma estrutura rígida e estável.

Para o dimensionamento da estrutura estabeleceu-se que esta deveria ser capaz de resistir, adequadamente, às condições da figura 3.5, procurando-se a simulação de uma situação extrema. O resultado ideal seria garantir a repetibilidade do robô, cujo valor mínimo, na amostra de manipuladores analisada, é de 0.02 *mm* (tabela A.2, em apêndice). No entanto, dadas as exigentes condições do teste, esse valor é bastante arrojado, dado que é necessário obter um compromisso

entre a rigidez e o peso da estrutura. Assim, definiu-se que o dimensionamento da estrutura apenas seria válido se a sua flexão for inferior a 0.50 mm , uma vez que, caso contrário, o recurso a materiais exóticos e a métodos de fabrico alternativos seria provável.

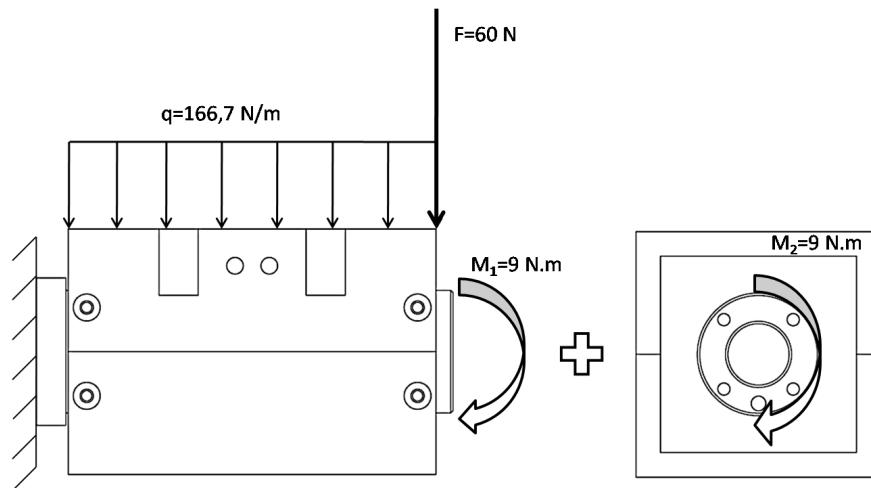


Figura 3.5: Condições fronteira para a simulação numérica.

As condições fronteira para a realização da simulação numérica são as seguintes:

- Punho do manipulador encastrado;
- Ligações aparafusadas entre as diferentes peças;
- Carregamento uniforme de $166,7\text{ N/m}$, ao longo da estrutura, simulando o peso da UGI e o dos diversos componentes (tabela B.1, em apêndice);
- Estrutura sujeita a uma flexão $F = 60\text{ N}$ e um momento $M_1 = 9\text{ Nm}$, simulando uma garra com um comprimento de 300 mm e um peso de 6 kg , uniformemente distribuído ao longo do seu comprimento (figura B.1, em apêndice);
- Estrutura sujeita a uma torção $M_2 = 9\text{ Nm}$, simulando um possível esforço deste tipo.

A ideia inicial para o desenvolvimento do protótipo foi a construção da UGI totalmente em alumínio, em que o corpo apresenta paredes de espessura variável entre $4\text{ e }7\text{ mm}$. Assim, consegue-se obter uma estrutura mais leve, mas ao mesmo tempo robusta nas zonas de encaixe das placas amovíveis. Entre as ligas de alumínio disponíveis para compra, seleccionou-se a liga 6082-T651, que apresenta altas resistências mecânica e à corrosão, e uma boa maquinagem. Com uma massa volúmica de 2.70 g/cm^3 , um módulo de elasticidade de 70 GPa e uma tensão de cedência de 310 MPa , esta parece adequar-se à estrutura em desenvolvimento.

Recorrendo a um *software* de simulação numérica, submeteu-se a estrutura às condições já definidas e obtiveram-se os resultados das figuras 3.6, (B.2 e B.3, em apêndice).

Verificou-se que o coeficiente de segurança mínimo é de 3.96 (figura B.3, em apêndice) e que, como seria de esperar, este se encontra na zona de acoplamento do manipulador. O valor obtido é bastante alto, o que garante que, nestas condições, a estrutura não entra em regime plástico. Mas, a estrutura apenas é válida se a sua flexão for inferior a 0.50 mm . Pela figura 3.6 pode-se

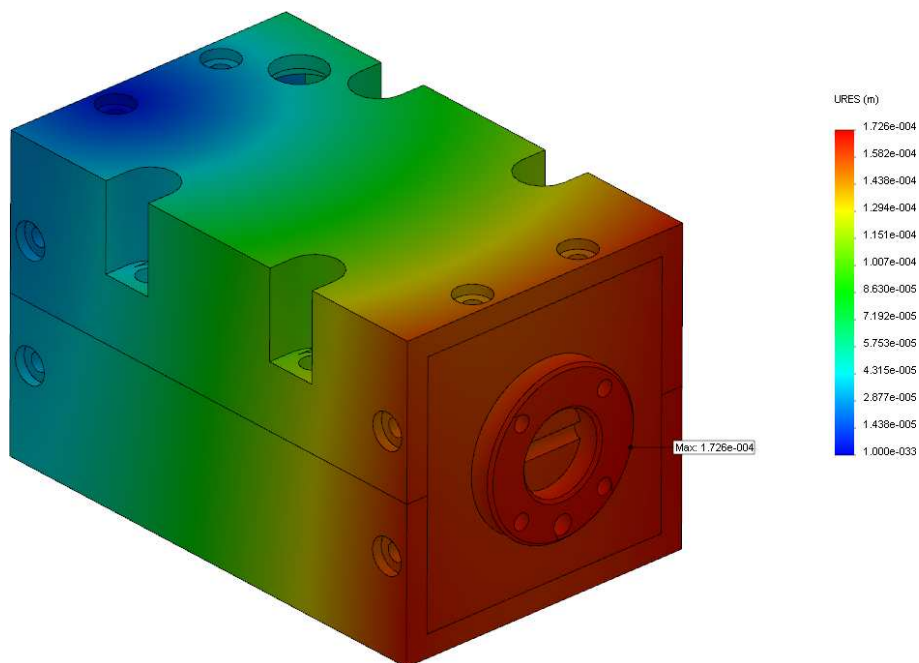


Figura 3.6: Resultados de deformação para a estrutura totalmente em alumínio.

constatar que a deformação máxima para a estrutura é de 0.17 mm e que se verifica na zona de acoplamento da unidade de actuação. Este valor permite concluir que a estrutura é válida e que representa uma boa solução para a construção da UGI.

Apesar disso, duas preocupações provenientes desta configuração levaram à procura de uma nova solução. A construção integral da estrutura em alumínio resulta numa massa de 1322 g , que é um valor relativamente alto, e a construção das paredes da estrutura com espessura variável leva a que o processo de fabrico seja mais complexo, resultando em mais tempo de maquinação. Portanto, procurou-se obter uma nova configuração, que apresente uma parede de espessura constante e que consiga fazer uma redução no peso total da estrutura.

A solução encontrada foi uma configuração híbrida que conjuga uma liga de alumínio a um material polimérico de elevado desempenho. O objectivo é construir as placas amovíveis em alumínio, pois estas servem de interface a outras unidades e requerem resistência mecânica, e as estruturas em forma de U, com uma espessura de parede de 10 mm , num plástico técnico.

Tendo em conta que na simulação anterior o valor obtido para o coeficiente de segurança é elevado e que se verifica no acoplamento do robô, optou-se por aplicar uma liga de alumínio com propriedades mecânicas inferiores à 6082-T651, na construção das placas amovíveis, resultando numa redução no custo do material. A liga seleccionada é a 5083-H111 e possui uma massa volúmica de 2.66 g/cm^3 , um módulo de elasticidade de 71 GPa e um tensão de cedência de 145 MPa .

Para a construção das estruturas seleccionou-se a poliamida ERTALON 6 SA, que é uma boa combinação de resistência mecânica e ao desgaste, rigidez e tenacidade, sendo de fácil maquinação e indicada para o fabrico de peças estruturais. Ela possui uma massa volúmica de 1.14 g/cm^3 , um módulo de elasticidade de 3.25 GPa e um tensão de cedência de 76 MPa .

Efectuando-se uma simulação numérica nesta configuração híbrida e com as mesmas condições do teste anterior, obtiveram-se os resultados das figuras 3.7, (B.4 e B.5, em apêndice).

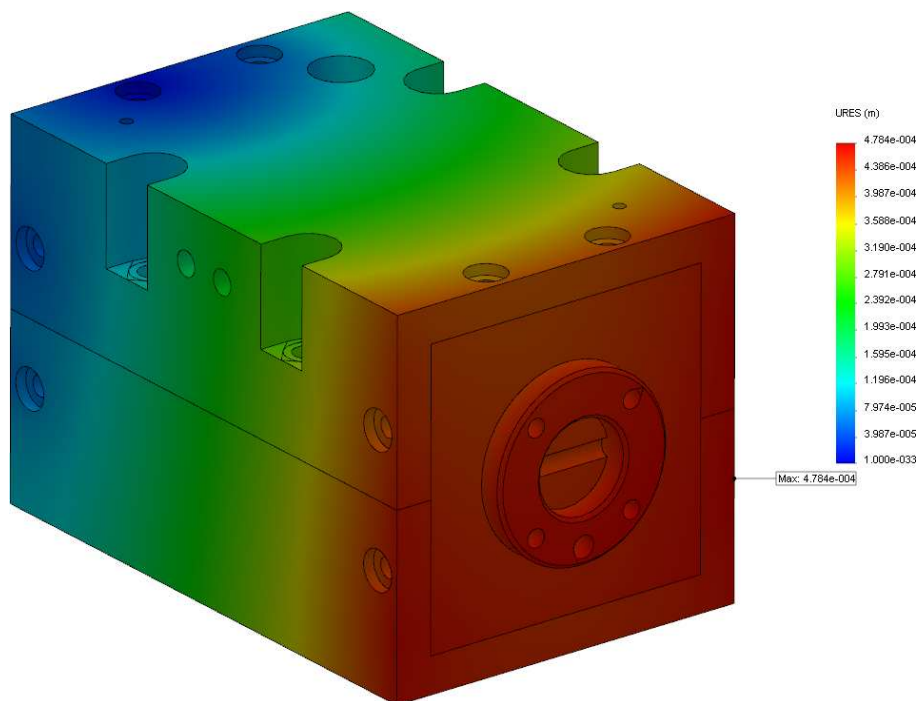


Figura 3.7: Resultados de deformação para a estrutura híbrida de alumínio e poliamida.

Verifica-se que o coeficiente de segurança mínimo para esta estrutura é de 2.71 (figura B.5, em apêndice) e, pela figura 3.7, que o valor da deformação máxima é de 0.48 *mm*. Com estes resultados valida-se também a implementação desta solução na construção da UGI.

Uma vez que ambas as soluções são plausíveis, procedeu-se à comparação das principais propriedades, pela tabela 3.3. Em primeiro lugar, verifica-se que houve um aumento considerável na flexão da estrutura, mas que continua a satisfazer a condição previamente estabelecida. O coeficiente de segurança em ambas as soluções é bastante superior a 1.5 e verifica-se ainda uma redução na massa de 22%, da configuração em alumínio para a híbrida. Isso é um ponto bastante positivo, pois a estrutura não limitará tanto o *payload* do manipulador.

Assim, tendo em conta a redução do peso total do conjunto, a menor complexidade geométrica, o menor tempo de maquinação e que o valor da flecha máxima da estrutura é inferior a 0.5 *mm*, a solução escolhida para a construção do protótipo foi a configuração híbrida de alumínio e poliamida.

Tabela 3.3: Tabela comparativa da configuração integral em alumínio com a híbrida de alumínio e poliamida.

	Alumínio	Híbrida
Deformação (<i>mm</i>)	0.17	0.48
Coeficiente de segurança	3.96	2.71
Massa (<i>g</i>)	1322	1034

3.3 Dimensionamento da unidade de visão

Para o desenho da interface entre os componentes da unidade de visão e a UGI, decidiu-se criar uma plataforma independente, responsável por unificar a câmara e o anel de *LEDs* num bloco único. Isso permite a remoção prática do conjunto e vai de encontro ao conceito de independência funcional definido para este protótipo.

Para além disso, o conceito de flexibilidade também se encontra presente no projecto desta plataforma. Pretende-se que ela possibilite, com ligeiras alterações, o acoplamento de diferentes câmaras fotográficas. Isso implica o desenvolvimento de um sistema que permita o ajuste da posição longitudinal da câmara dado que estas podem apresentar dimensões diferentes e podem ter diferentes lentes.

A solução encontrada para implementar este conceito baseia-se numa calha deslizante que, ao unir a câmara a um patim, permita o seu ajuste longitudinal. A posição é garantida pela travagem do patim através de um parafuso, como se pode verificar na figura 3.8 (a). Para o efeito, seleccionou-se uma calha de baixo perfil em alumínio anodizado, que apresenta um baixo peso, dimensões adequadas à estrutura e possibilita o deslizamento sem recurso a lubrificantes.

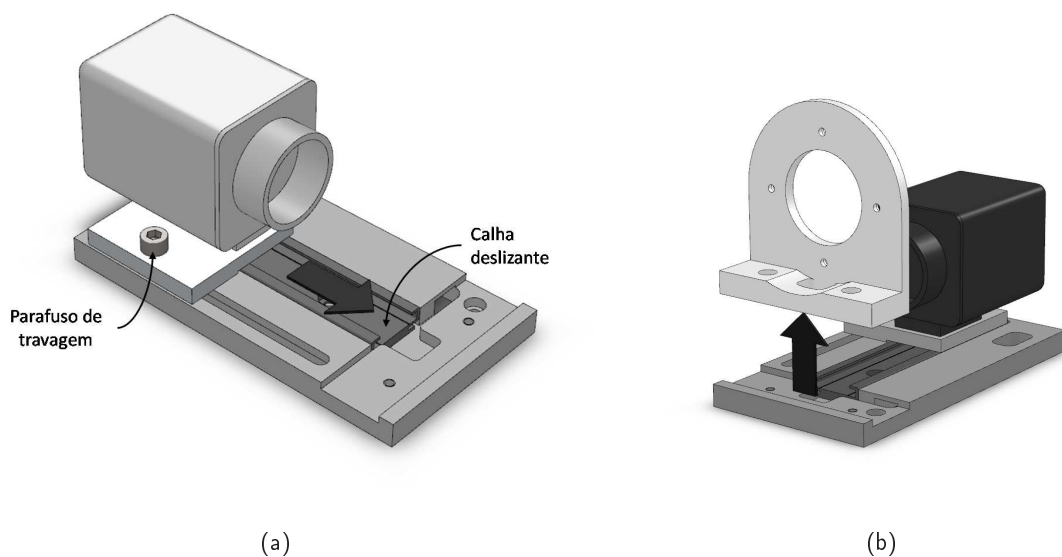


Figura 3.8: Ajuste longitudinal da câmara (a); Iluminação localizada amovível (b).

Por sua vez, o suporte do anel de *LEDs* também é amovível (figura 3.8 (b)), pois pode não se adequar à câmara utilizada. Assim, pode-se facilmente adaptar outro modo de iluminação localizada à estrutura.

À excepção da placa de apoio da câmara, o material escolhido para o fabrico das peças desta plataforma é um polietileno de elevado peso molecular, que apresenta uma massa volúmica de 0.94 g/cm^3 , alta resistência ao desgaste, baixo coeficiente de atrito e é de fácil de maquinação. Todas estas características contribuíram para a sua escolha, pois pretende-se uma estrutura de baixo peso, que favoreça o deslizamento da câmara e que facilite o processo de fabrico. A placa de apoio da câmara é fabricada em alumínio por razões de estabilidade dimensional, pois é crucial garantir a orientação da câmara.

Outro elemento constituinte da unidade de visão e que necessita de ser incorporado na UGI é o gerador de padrões de luz estruturada. Este encontra-se acoplado ao servomotor de controlo por uma abraçadeira maquinada em alumínio e por sua vez, o servo é ligado à base da estrutura por um apoio muito simples, também em alumínio (figura 3.9). Assim, o sistema permite efectuar o controlo angular da projecção da luz estruturada e afasta o eixo de rotação do servo da base da UGI, dando uma maior amplitude de movimento.

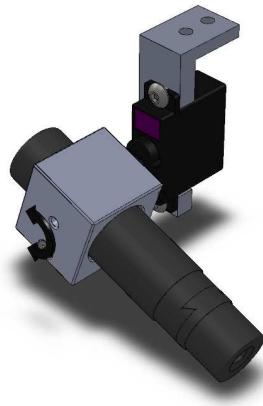


Figura 3.9: Fixação do ponteiro laser e respectivos acessórios de controlo.

3.4 Interfaces de comunicação e alimentação

De modo a garantir o funcionamento da UGI, é necessário incluir alguns componentes que façam a interface entre as três unidades e o computador remoto, e que forneçam à UGI todos os recursos que ela necessita.

Como já foi definido anteriormente, a UGI apresenta um zona de conexão onde serão colocados os conectores que fazem a comunicação entre ela e o computador remoto e que fornecem o ar comprimido e a tensão aos elementos do sistema. Para isso, optou-se por separar a transferência de dados da alimentação de tensão, recorrendo a conectores distintos. Os conectores eléctricos seleccionados são do tipo de montagem de painel em cotovelo (figura 3.10 (a)), o que permite o fácil acoplamento à estrutura e dispõe a cablagem de modo a facilitar a movimentação do manipulador. Estes são conectores industriais, com classe de protecção IP67/IP68, fabricados em zinco niquado e possuem um núcleo modular, que permite escolher o número de contactos que melhor se adequa à aplicação. Seleccionou-se um núcleo de 17 contactos para a transferência de dados e um de 8+1 para a alimentação. O conector pneumático de alimentação da UGI é do tipo de aperto rápido, com montagem "passa-muro" e elevada eficiência.

A interface entre a UGI e a unidade de actuação é assegurada por conectores embutidos na placa amovível de acoplamento. Seleccionou-se um conector eléctrico de pequenas dimensões, com quatro contactos, responsável por fazer a transferência de dados e alimentar a unidade de actuação (figura 3.10 (b)), e o ar comprimido é fornecido por conectores do tipo "passa-muro".



Figura 3.10: Dispositivos de conexão: conector de montagem de painel em cotovelo (a), conector de interface à unidade de actuação (b).

3.5 Unidade de actuação

A unidade de actuação utilizada para a demonstração do conceito de independência funcional, consiste numa garra pneumática com dois dedos de actuação paralela, associada a dispositivos sensoriais para medição de distância. Essa garra já se encontrava no Laboratório de Automação e Robótica da Universidade de Aveiro e é indicada para a realização de tarefas pesadas, representando um caso extremo, em termos de volumetria e peso, de possíveis garras a acoplar ao sistema. Com um comprimento de 200 *mm*, uma largura de 120 *mm* e um peso de 2.6 *kgf*, esta demonstra ser bastante inadequada, dado que existem diversas soluções bastante mais compactas e com a mesma funcionalidade, no mercado. Para além disso, é uma garra muito pouco versátil, pois a sua configuração limita consideravelmente o tipo de peças a recolher, principalmente em ambientes não-estruturados.

Apesar das limitações, toda a inadequação da garra acaba por ser um ponto positivo na demonstração do conceito, pois está-se a testar o sistema em condições extremas e a validar, ao mesmo tempo, uma grande gama de outras soluções.

As grandes dimensões que a unidade de actuação apresenta, levam a que a amplitude do campo de percepção da unidade de visão seja limitada, dado que se pretende a realização de operações de varrimento de luz estruturada. É, então, fundamental realizar uma análise que permita a determinação da distância mínima entre a câmara e o ambiente de trabalho, para que isso se verifique.

Considerando que a câmara está a utilizar uma lente com um ângulo de visão de 30°, e que o ponteiro tem uma rotação de 180° e um alcance de 1000 *mm*, pode-se observar, na imagem 3.11, o ponto nulo de varrimento, que determina a distância mínima de aproximação à peça, e a zona activa de varrimento. No gráfico da figura 3.12 encontra-se a relação entre o alcance da unidade de visão e a amplitude do varrimento e verifica-se que o ponto nulo acontece a uma distância de 345 *mm* e que, a 1 *m* de distância, pode-se realizar um varrimento com amplitude de 340 *mm*.

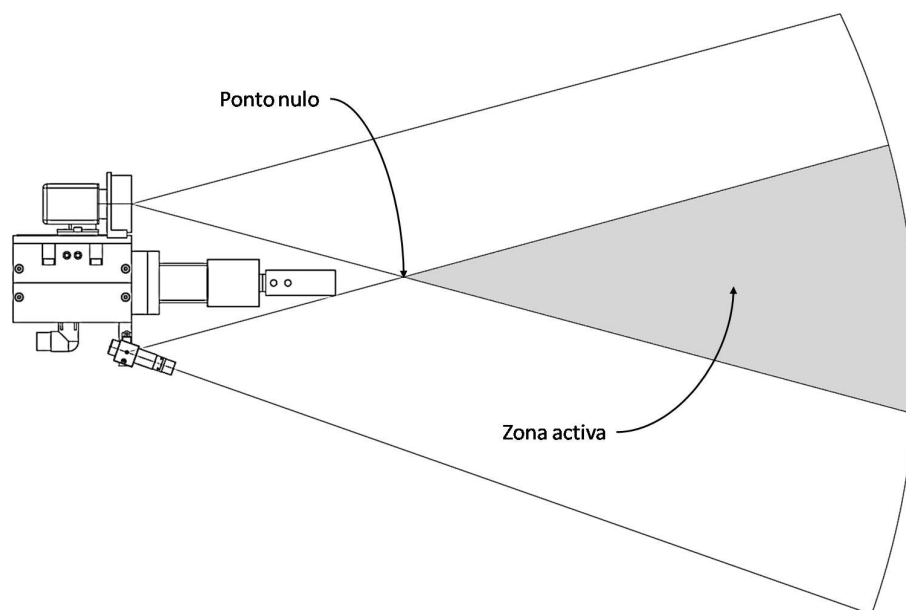


Figura 3.11: Ponto nulo e zona activa de varrimento para a garra testada.

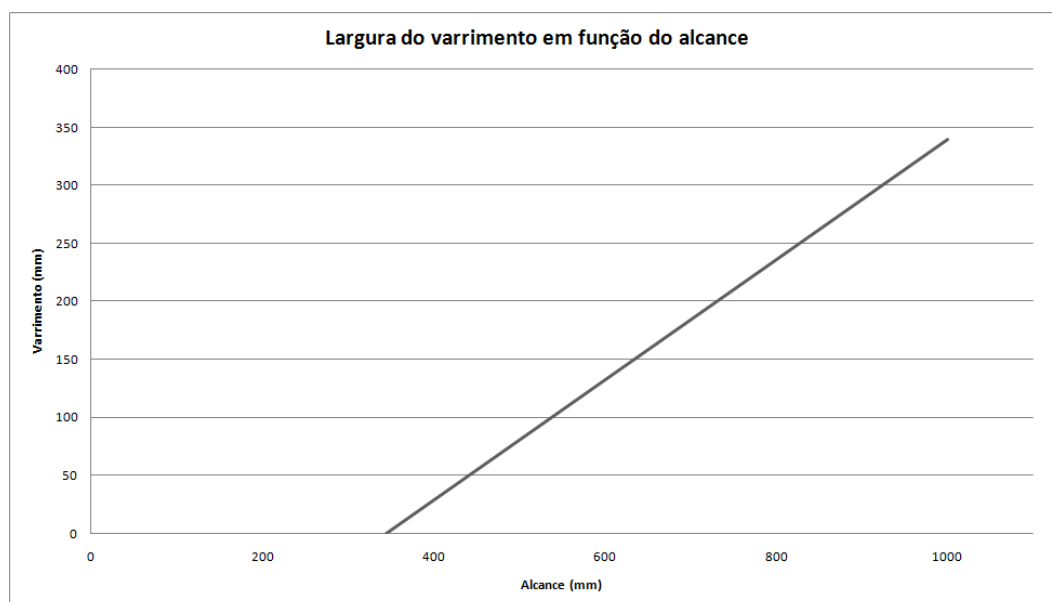


Figura 3.12: Gráfico representativo da largura de varrimento em função do alcance.

Capítulo 4

Automação do sistema

Tendo em conta todas as funcionalidades que este protótipo deve contemplar, o processo de automação do sistema é um passo essencial no seu desenvolvimento. É nele que se define todo o *hardware* e *software* responsáveis por garantir a comunicação entre as diferentes unidades e por atribuir ao sistema as funcionalidades de auto-reconhecimento, segurança e diagnóstico, *feedback* sensorial e controlo.

4.1 Princípio de funcionamento

O conceito de independência funcional é o ponto de partida para todo o processo de automação. A separação das unidades do sistema em blocos funcionais independentes é a base para a construção deste protótipo e apenas é conseguida pela conciliação do projecto de sistemas eléctricos ao desenvolvimento de *software*.

A UGI é o bloco central de todo o sistema, servindo de interface às unidades de actuação e visão, e garantindo a comunicação com o computador remoto. Esta deve ser capaz de receber informações de comando provenientes da interface remota, permitindo o controlo do servomotor e a comutação dos estados dos *LEDs* de diagnóstico, da iluminação localizada e do ponteiro laser.

O controlo do servomotor permite o ajuste da orientação de projecção da luz estruturada, bem como a realização de operações de varrimento. Os *LEDs* de diagnóstico devem poder ser desabilitados remotamente para evitar possíveis interferências com o sistema de visão, e a comutação da iluminação localizada e do ponteiro laser é essencial para a unidade de visão, pois permite jogar com as condições de luminosidade. A UGI também deve estar preparada para adquirir informação sensorial e enviá-la para a interface remota.

Por sua vez, a UGI é a ponte de ligação das diversas unidades com o computador remoto, sendo responsável por gerir toda a informação, à excepção dos dados adquiridos pela câmara, e reenviá-la para a respectiva unidade de destino. A interface de comunicação seleccionada para este sistema é a RS-232, devido à sua fácil implementação na comunicação com o computador remoto. O sistema de actuação também comunica com a UGI por linha de série, recorrendo a um protocolo comum previamente estabelecido para a comunicação de todo o sistema.

A unidade de actuação funciona seguindo um princípio parecido ao da UGI, permitindo o controlo das válvulas de actuação através dos comandos enviados e que tiveram origem na interface remota. Tendo em conta que a unidade de actuação utilizada para a demonstração do conceito se encontra munida de diversos sensores ópticos para a medição de distância, esta é capaz de adquirir os dados sensoriais e enviá-los, pela linha de série, para a UGI.

Todas estas unidades funcionam segundo o princípio de *broadcast*, em que, a partir do momento em que a unidade é activada, a transferência de dados é inicializada e é feito o envio de informações de um modo cíclico e com uma determinada cadência.

É na interface remota que o utilizador faz o controlo de todos os dispositivos descritos anteriormente, bem como a monitorização de toda a informação adquirida pelo sistema. Para além da monitorização dos estados do sistema e da informação sensorial, a interface também permite a visualização da imagem obtida pela câmara, que se encontra ligada directamente ao computador.

4.2 Desenvolvimento dos sistemas eléctricos

A implementação deste sistema é baseada em dois microcontroladores responsáveis por estabelecer as comunicações, por fazer a aquisição e gestão de sinal e por controlar os diversos dispositivos, de acordo com o diagrama da figura 4.1.

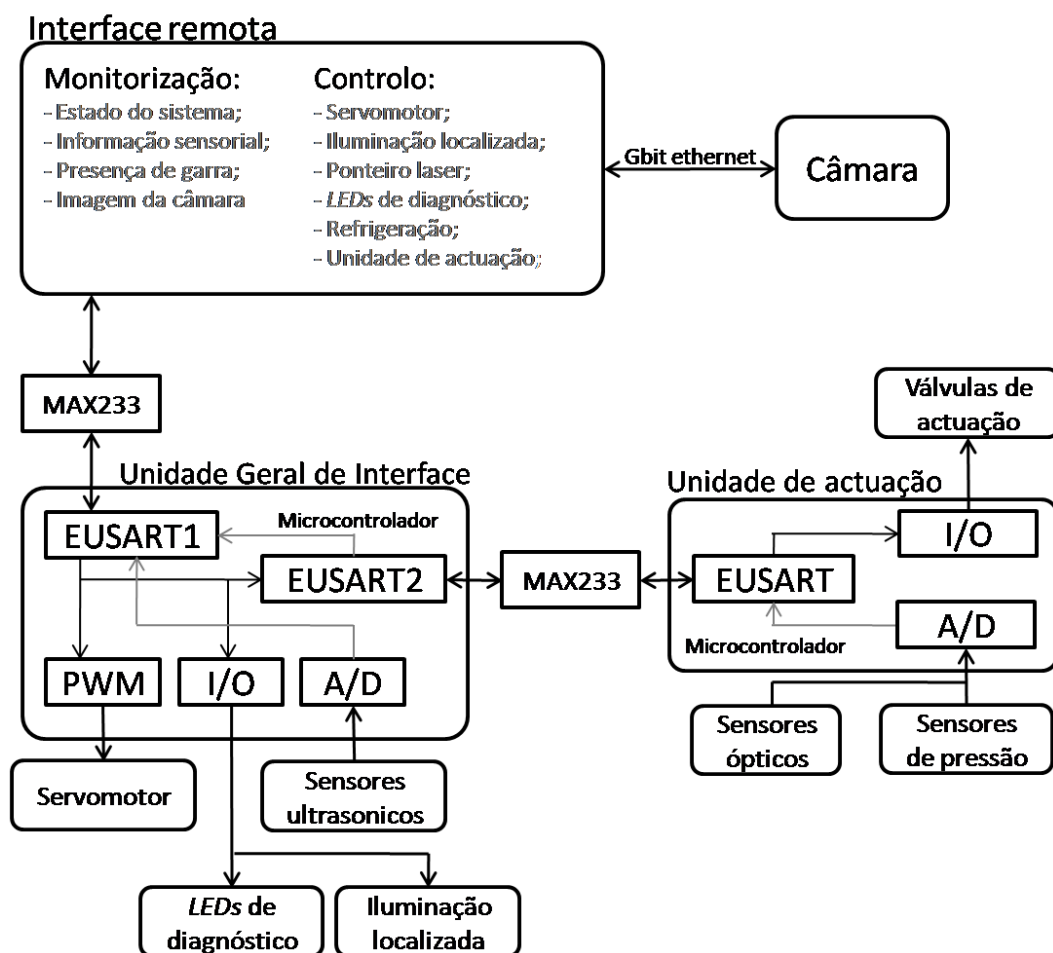


Figura 4.1: Funcionamento global do sistema.

O microcontrolador seleccionado para desempenhar as funcionalidades definidas para a UGI é o PIC18F26J11 da Microchip. Esta nova família de microcontroladores apresenta diversas características especiais que o diferenciam das outras. Estes operam numa gama de voltagem de 2.0 a

3.6 V, possuem opções para gestão de consumo de corrente, permitem o remapeamento de pinos, os pinos digitais são tolerantes a tensões de entrada até 5.5 V, etc.. No entanto, a razão que levou à sua selecção para esta aplicação é o facto de possuir dois módulos EUSART. Essa é uma característica essencial ao funcionamento da UGI, pois cada um desses módulos será responsável por estabelecer a comunicação, por linha de série, com a interface remota e com a unidade de actuação.

Tendo em conta que os módulos EUSART dos microcontroladores operam a ± 5 V, recorre-se aos *drivers* MAX233 para estabelecer a comunicação por linha de série a ± 12 V. Optou-se por este modelo, em detrimento do comum MAX232, uma vez que não necessita de condensadores externos, permitindo uma redução no número dos componentes usados e na área da placa de circuito impresso.

O controlo da posição angular do servomotor é feito através um sinal de controlo codificado. Essa codificação é feita recorrendo a modulação PWM, em que a duração do pulso determina a posição do eixo do servo e, enquanto esse sinal se mantiver activo, a posição é assegurada. No entanto, a frequência desse sinal é de 50 Hz, o que impede a utilização do módulo de PWM do microcontrolador, pois a frequência mínima gerada por este é de 2.44 kHz. Recorre-se, então, a um dos módulos de TIMER do microcontrolador para gerar o sinal de controlo do servomotor.

Os dispositivos sensoriais intrínsecos seleccionados para equipar a UGI, são os sensores ultrassónicos LV-MaxSonar-EZ0 (figura 4.2 (a)) e têm como função principal a protecção dos componentes primários do sistema, evitando a sua colisão com elementos do ambiente de trabalho. Este é capaz de detectar objectos de 0 a 6.45 m, devolvendo informação sobre a distância do obstáculo de 0.15 a 6.45 m, com uma resolução de 2.54 cm. O seu feixe é de grande largura e apresenta uma alta sensibilidade, o que é indicado para questões de segurança. As suas interfaces de saída possíveis são PWM, analógica e linha RS-232, sendo que para esta aplicação recorre-se à saída analógica, tirando partido do módulo de conversão analógico-digital do microcontrolador, uma vez que as portas de comunicação por linha série do microcontrolador já se encontram ocupadas. O sensor pode ser alimentado de 2.5 a 5.5 V e a saída analógica devolve um sinal de tensão linear em função da distância do objecto.

A refrigeração da UGI também foi outra preocupação tida em conta no projecto, tanto mecânico como electrónico, do protótipo em desenvolvimento. Tendo em conta que no interior da UGI estarão alojados grande parte dos dispositivos electrónicos, é necessário garantir que a temperatura no seu interior se mantém controlada e a um valor que permita o correcto funcionamento do conjunto. A solução encontrada para isso é a implementação de convecção forçada no interior da estrutura, através de uma ventoinha.

Tendo em conta que a dissipação de potência total dos componentes electrónicos no interior da UGI ronda os 50 W, que a temperatura máxima de operação é de 40 °C e que a temperatura do ar à saída da ventoinha não deve exceder os 70 °C, é possível determinar o caudal volúmico mínimo do ar, para efectuar a refrigeração da UGI. Considerando o pior caso possível, em que o ar de entrada se encontra a 40 °C e assumindo que não se verifica perda de calor pelas paredes da UGI, cujo material é poliamida, o caudal mássico (\dot{m}) necessário, é obtido pela equação 4.1,

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{C_p(T_{out} - T_{in})} = \frac{50}{1007(70 - 40)} = 0.099 \text{ kg/min} \quad (4.1)$$

em que C_p corresponde ao calor específico do ar à temperatura média de 55 °C.

Por sua vez, sabendo que na pior das hipóteses o ar entra na ventoinha a 70 °C e considerando o ar à pressão atmosférica, obtém-se a densidade do ar que entra na ventoinha (ρ) pela expressão

4.2, que substituindo na equação 4.3, dá origem ao caudal volúmico (\dot{V}).

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{101.325}{0.287 \times (70 + 275)} = 1.023 \text{ kg/m}^3 \quad (4.2)$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{0.099}{1.023} = 0.097 \text{ m}^3/\text{min} \quad (4.3)$$

Partindo deste valor seleccionou-se uma ventoinha da SUNON, com dimensões $25 \times 25 \times 10 \text{ mm}$ e um caudal volúmico de $3.5 \text{ CFM}^1 = 0.099 \text{ m}^3/\text{min}$. Associando a ventoinha a um termistor localizado na placa de circuito impresso da UGI, é possível efectuar o controlo da velocidade da ventoinha, alimentando-a através de modulação PWM, de modo a estabilizar a temperatura no interior da UGI.

Para a unidade de actuação seleccionou-se o microcontrolador PIC18F2580 da Microchip, que possui os módulos básicos para o seu funcionamento. Esses módulos incluem a EUSART para a comunicação com a UGI e o conversor analógico-digital para a aquisição dos dados sensoriais extrínsecos. Os sensores ópticos escolhidos para equipar a unidade de actuação são os Sharp GP2D12 (figura 4.2 (b)), que são sensores analógicos para a medição de distância que usam infravermelhos para detectar objectos localizados entre 10 e 80 cm de distância. Este sensor devolve um sinal de tensão não-linear em função da distância a que se encontra o objecto, possui uma alta imunidade à luminosidade e à cor do objecto e não necessita de qualquer electrónica acessória.

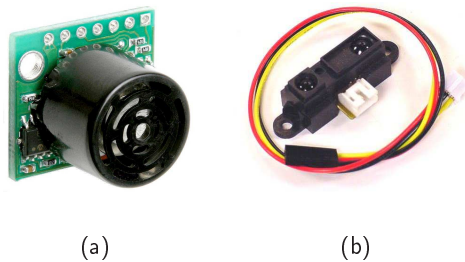


Figura 4.2: Sensor ultrasonico LV-MaxSonar-EZ0 (a), sensor óptico Sharp GP2D12 (b).

A comutação dos diversos dispositivos é feita através das portas de entrada/saída dos microcontroladores que, quando o consumo de corrente por parte de um dispositivo é elevada, comutam MOSFETS que permitem a sua actuação. Esse é o caso do anel de LEDs, do ponteiro laser e das válvulas pneumáticas

A diversidade nas tensões de operação é uma das principais dificuldades na construção dos circuitos eléctricos para esta aplicação, uma vez que neste sistema há dispositivos que operam a 24, 5 e 3.3 V. Isso requer a implementação de um sistema que permita a obtenção desses níveis de tensão, garantindo que todos os dispositivos são alimentados correctamente. Tendo em conta que a UGI pode ser alimentada a 12 ou a 24 V, optou-se por recorrer a dois reguladores de tensão que irão regular a tensão de entrada, para 5 e 3.3 V. No entanto, é necessário ter em conta o consumo de corrente efectuado pelo sistema, de modo a que os reguladores sejam capazes de se comportar correctamente, qualquer que seja esse consumo. Para isso, efectuou-se uma estimativa do consumo corrente máximo efectuado pelo sistema, representado na tabela 4.1.

¹Cubic Feet per Minute

Tabela 4.1: Estimativa do consumo máximo de corrente do sistema.

Componente	Consumo máximo (mA)
Anel de LEDs	144
Servomotor	250
Projector laser	100
Ventoinha	120
Microcontroladores	500
MAX233	20
Sharp GP2D12	200
LV-MaxSonar-EZ0	12
Válvulas de actuação	100
TOTAL	1446

De um modo geral, esta estimativa permite concluir que os reguladores de tensão seleccionados devem apresentar uma corrente de saída mínima de 1.5 A e que devem ter uma diferença de tensões da entrada para a saída, superior a 19 V. Tendo em conta que a maioria dos dispositivos operam a 5 V, seleccionou-se o regulador LT1085 para regular a tensão para 5 V, o qual possui uma diferença de tensão da entrada para a saída até 30 V, uma corrente de saída de 3 A e uma queda de tensão bastante baixa. Para regular a tensão dos 5 para os 3.3 V, seleccionou-se o LM1117T-3.3 que é suficiente para alimentar o PIC18F26J11.

Para além disso, a aquisição de sinal nas entradas analógicas do PIC18F26J11 também é afectada por este problema. Apesar de os sensores ultrasonicos LV-MaxSonar-EZ0 poderem funcionar de 2.5 a 5.5 V, optou-se por alimentá-los a 5 V de modo a obter um maior alcance e uma maior largura de feixe. Isso implica a adequação dos sinais enviados pelos sensores, para que possam ser lidos e traduzidos pelo microcontrolador, que opera a 3.3 V. Existem diversas maneiras e circuitos capazes de realizar esta tarefa, mas devido à simplicidade optou-se pelo divisor resistivo.

Sabendo que a tensão máxima na saída do sensor (V_{sen}) é de 5.5 V, e tendo em vista que a tensão no pino do microcontrolador (V_{pic}) não pode ultrapassar os 3.6 V, fixa-se o valor da resistência R_1 em 1 k Ω e obtém-se o valor da outra resistência pela equação 4.4.

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{V_{sen} - V_{pic}}{V_{pic}} = 1000 \cdot \frac{5.5 - 3.6}{3.62} = 527.8 \, \Omega \quad (4.4)$$

Tendo em conta que o valor comercial mais próximo e acima de 527.8 Ω é de 560 Ω , este será o valor da resistência R_2 . Os esquemas eléctricos para os circuitos da UGI e da unidade de actuação encontram-se no apêndice C.

4.2.1 Placas de circuito impresso

O recurso a múltiplos conectores é um factor bastante importante no desenvolvimento das PCBs (*Printed Circuit Boards*) para este sistema, dado que há um grande número de dispositivos, o que implica que a sua conexão seja prática e robusta. Para isso, seleccionaram-se os conectores da figura 4.3, cuja configuração de quatro conexões em linha, resulta numa solução bastante compacta e robusta, adaptando-se aos requisitos do sistema.

Optou-se por recorrer a componentes do tipo DIP (*Dual In-line Package*) sempre que possível e a placas de dupla camada, de modo a facilitar o processo de montagem e o roteamento das placas.

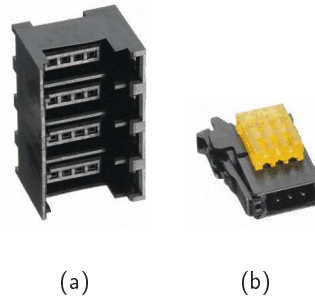


Figura 4.3: Conectores utilizados nas PCBs: conector de placa (a), conector de cabo (b).

Para a UGI, as dimensões da PCB encontram-se limitadas pelas dimensões interiores da estrutura e pelos furos de apoio à placa. Assim, estabeleceu-se que as dimensões da placa seriam de $64 \times 78 \text{ mm}^2$. As dimensões da placa da unidade de actuação são de $48 \times 58 \text{ mm}^2$, correspondendo à menor área possível que permite a inclusão de todos os componentes.

Partindo dos esquemas eléctricos já criados, dispuseram-se os componentes nas respectivas placas e fez-se o roteamento das linhas de conexão. Os desenhos das placas de circuito impresso obtidos para a UGI e para a unidade de actuação encontram-se nas figuras 4.4 (a) e (b), respectivamente.

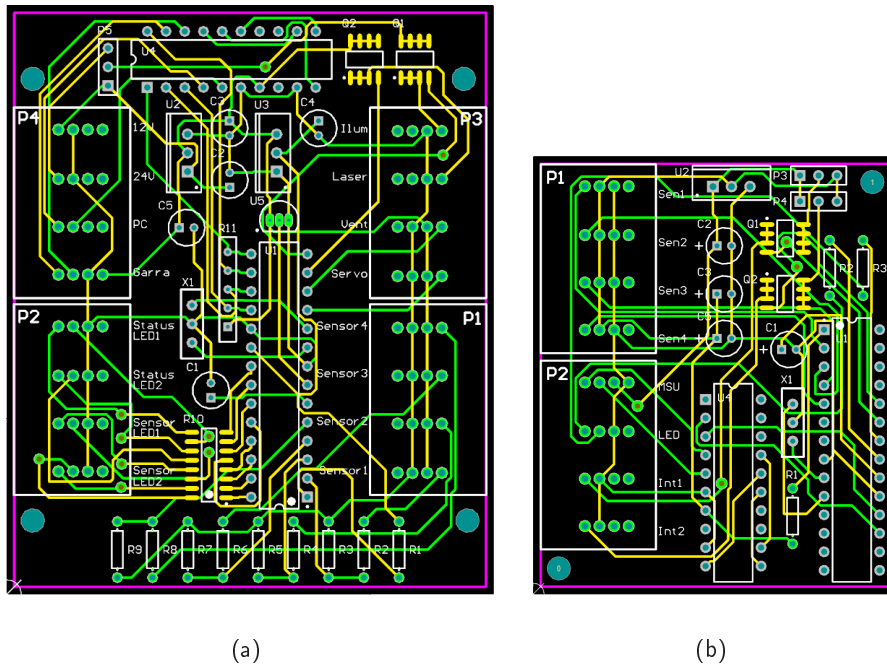


Figura 4.4: Placas de circuito impresso: UGI (a), unidade de actuação (b).

Para a fixação da placa de circuito impresso na UGI optou-se por criar quatro apoios na estrutura superior da unidade que, juntamente com quatro parafusos em nylon, permitem a suspensão da placa no seu interior (figura 4.5). Assim, garante-se a estabilidade da PCB durante o movimento do manipulador e facilita-se a sua acessibilidade e manuseamento, quando necessário. Na figura 4.5

pode-se ainda observar que a cavidade de montagem da ventoinha se encontra numa das paredes laterais da estrutura superior da UGI, fazendo a ventilação directa dos componentes electrónicos.

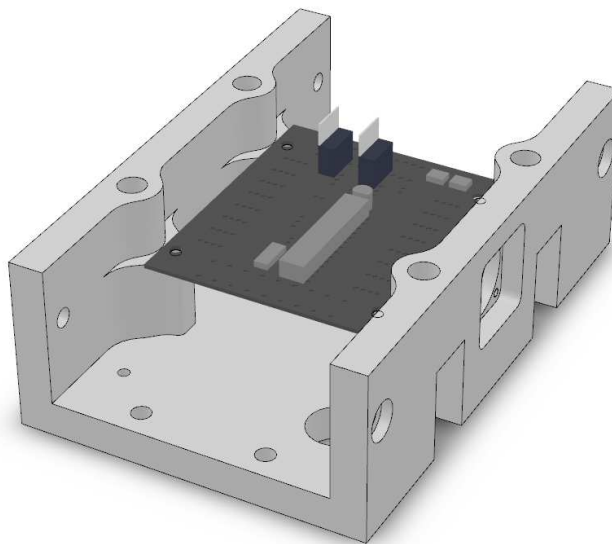


Figura 4.5: Sistema de fixação da PCB à UGI.

4.3 Desenvolvimento do software de controlo

4.3.1 Protocolo de comunicação

Para a criação do protocolo de comunicação optou-se por fazer o envio de dados recorrendo a dois bytes, em que o primeiro permite a identificação do tipo de dados recebidos e o segundo inclui os dados propriamente ditos. A estrutura do primeiro byte encontra-se na figura 4.6.

Byte n.º1							
Nmsg	Tipo				Número		
bit7							bit0

Figura 4.6: Estrutura do byte n.º 1 da mensagem.

O campo *Nmsg* é um bit que permite a identificação do número de ordem do byte de mensagem. Os bits de 3 a 6 correspondem ao campo *Tipo*, que permite identificar o tipo de informação transmitida. Com este campo é possível distinguir se a informação transmitida é relativa a um determinado tipo de sensor ou ao estado de algum outro componente do sistema, dando lugar a 16 tipos de informação diferentes.

O campo *Número* é constituído por 3 bits e permite, no caso de existência de mais do que uma fonte de dados do mesmo tipo, saber de onde essa informação é proveniente. Por exemplo, na

existência de dois sensores fotoeléctricos, correspondendo a um determinado tipo de informação, este campo permite diferenciar de qual deles esta é proveniente. Este campo atribui 8 fontes por cada tipo de informação. No caso de haver mais do que 8 fontes do mesmo tipo, cria-se um novo tipo com as mesmas características, alargando-o para mais 8 fontes.

Tendo em conta todos os dispositivos do sistema, atribuiu-se a cada um dos campos da mensagem um valor que permita a identificação inequívoca de cada dispositivo. Os valores que cada campo toma encontram-se na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Valores atribuídos a cada um dos campos do byte n.º1.

Tipo	Número
0000 - Estado	000 - Pedido de actualização
	001 - LEDs de diagnóstico
	010 - Iluminação localizada
	011 - Ponteiro laser
	100 - Válvula de actuação de abertura
	101 - Válvula de actuação de fecho
0001 - Motores	000 - Servomotor
	001 - Ventoinha
0010 - Sensores ultrasonicos	000 - Sensor n.º 1
	001 - Sensor n.º 2
0011 - Sensores de distância	000 - Sensor n.º 1
	001 - Sensor n.º 2
0100 - Sensores de temperatura	000 - Sensor n.º 1
0101 - Garra	000 - Garra de actuação linear paralela

A estrutura do segundo byte da mensagem encontra-se na figura 4.7, na qual o campo *Nmsg* é o bit que permite a identificação do byte da mensagem, e o campo *Dados* faz o transporte da informação, obrigando a que os dados a enviar tenham uma resolução máxima de 7 bits.

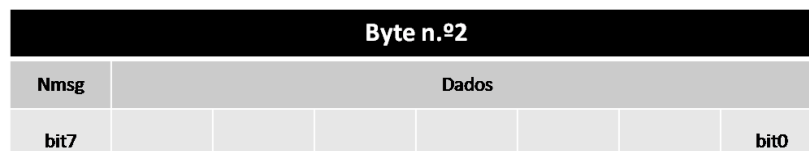


Figura 4.7: Estrutura do byte n.º2 da mensagem.

4.3.2 Microcontroladores

A programação dos microcontroladores nesta aplicação requer a sua devida inicialização, mas também a gestão de todas as comunicações, efectuando a correcta recepção e decodificação de mensagens, bem como a sua codificação e envio.

A inicialização do microcontrolador implica a programação de todos os registos que permitem o seu devido funcionamento e o dos módulos ADC (*Analog-to-Digital Converter*), EUSART (*Enhanced Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*) e TIMERS necessários.

O algoritmo de envio de dados encontra-se representado no diagrama da figura 4.8 e é o mesmo para a UGI e para a unidade de actuação. Como já foi referido, o envio de dados de ambas as

unidades é feito ciclicamente e, para isso, recorre-se a um dos módulos de TIMER de ambos os microcontroladores.

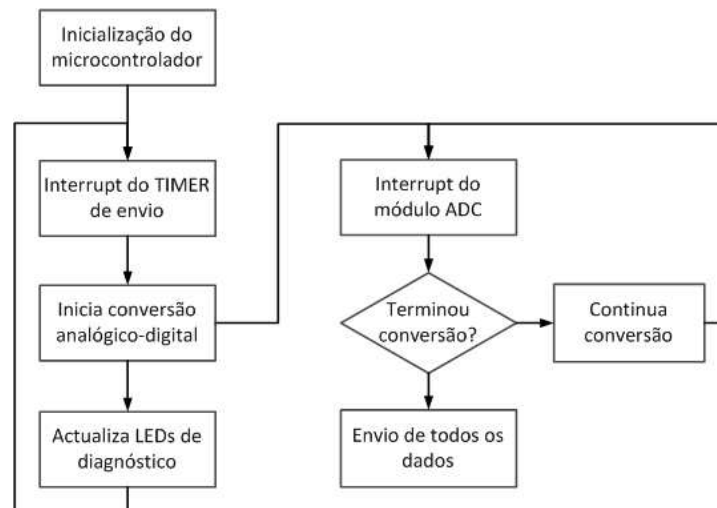


Figura 4.8: Diagrama de fluxo do algoritmo de envio dos microcontroladores.

Após a devida inicialização do microcontrolador e dos módulos necessários, o TIMER responsável pelo ciclo de envio é activado e a rotina de envio é iniciada. De cada vez que o contador do TIMER atinge o tempo estabelecido, é recebido o respectivo *interrupt* que, por sua vez, inicia a conversão analógico-digital das entradas analógicas do microcontrolador activas. Uma vez que o módulo ADC apenas permite a conversão de um canal de cada vez, é necessário efectuar a conversão de todos os canais activos antes de efectuar o envio dos dados, recorrendo ao *interrupt* do módulo ADC. Quando a conversão é terminada, é feito o envio das mensagens para a unidade respectiva e é feita a actualização dos *LEDs* de diagnóstico.

É de realçar que para que o algoritmo funcione correctamente é necessário garantir que o tempo de ciclo do TIMER seja superior aos tempos de conversão, aquisição, envio e actualização.

Os algoritmos de recepção são diferentes para cada uma das portas de série do sistema, reagindo de modos distintos à informação recebida.

A recepção dos dados enviados da interface remota para a UGI segue o algoritmo da figura 4.9, em que, uma vez inicializado o PIC18F26J11 e respectivos módulos, é activada a recepção na EUSART1, permitindo a recepção de mensagens. Sempre que é feita a recepção de uma mensagem na porta de série, o respectivo *interrupt* é accionado e é feita a leitura dos dados. Se os dados recebidos corresponderem ao primeiro byte, é feito o armazenamento dos campos *Tipo* e *Número* para posterior utilização. No caso do segundo byte, é feita a leitura do tipo de dados recebidos, já armazenada numa variável global, de modo a verificar o destino da informação. Se esta for destinada à UGI, verifica-se se é do tipo *Estado*, para proceder ou à comutação ou ao controlo do respectivo dispositivo. Se o destino for a unidade de actuação é feito o envio da mensagem pela EUSART2.

O algoritmo de recepção dos dados provenientes da unidade de actuação funciona de um modo similar ao descrito anteriormente. A única diferença reside na acção realizada após a verificação do destino da mensagem (figura 4.10). Se a mensagem for destinada à UGI, é feita a actualização do *LED* de diagnóstico que mostra o estado do sistema de actuação. Caso contrário, é feito o envio da mensagem para a interface remota, pela EUSART1.

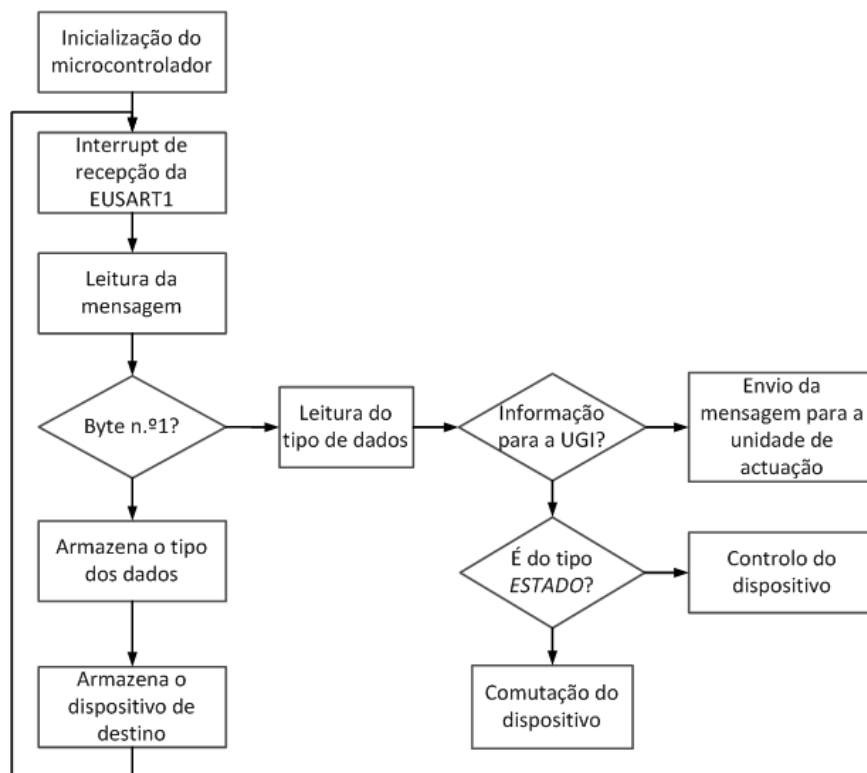


Figura 4.9: Diagrama de fluxo do algoritmo de recepção na UGI, por parte do computador remoto.

Finalmente, a recepção de dados no sistema de actuação é feita seguindo o mesmo princípio da UGI. Após inicialização do PIC18F2850, é feita a leitura do byte recebido e a verificação do respectivo número. Se for o byte n.º1, é armazenado o tipo e o dispositivo de destino, se for o n.º2, é feita a comutação do dispositivo, que neste caso são as válvulas de actuação. O diagrama representativo do algoritmo de recepção pode ser visualizado na figura 4.11.

Com a implementação destes algoritmos garante-se a comunicação entre as várias unidades do sistema e o devido controlo dos diversos dispositivos.

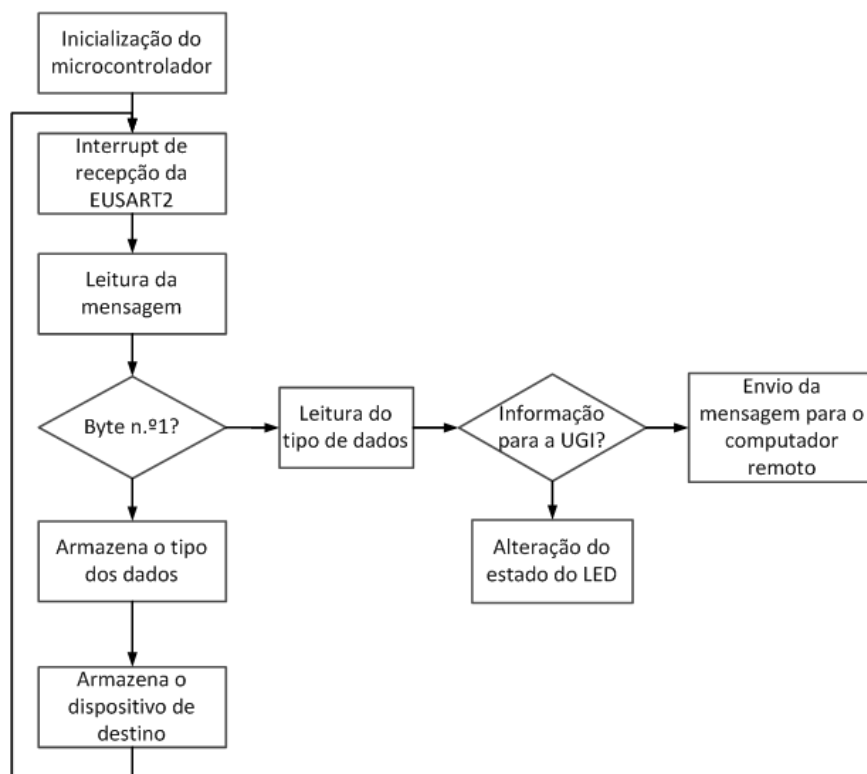


Figura 4.10: Diagrama de fluxo do algoritmo de recepção na UGI, por parte do sistema de actuação.

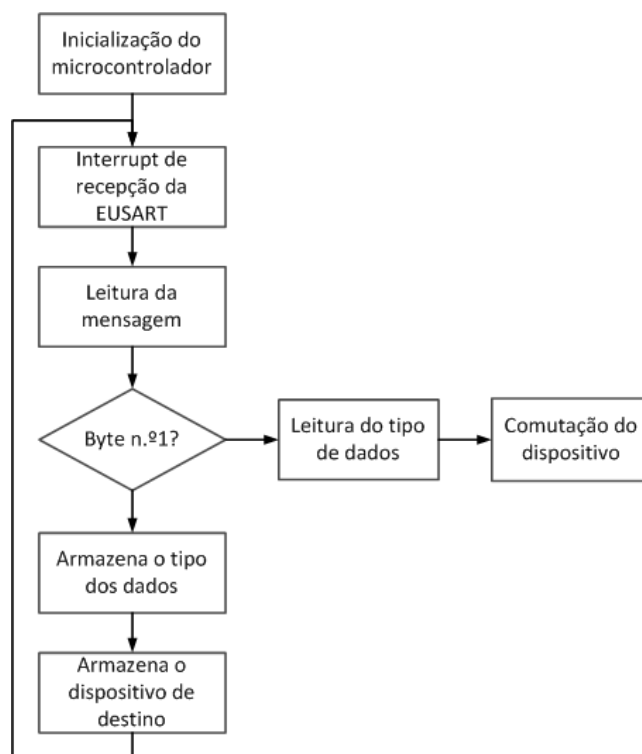


Figura 4.11: Diagrama de fluxo do algoritmo de recepção no sistema de actuação.

4.3.3 Interface de controlo

O programa responsável pela interface remota baseia-se na criação de dois processos que desempenham funções diferentes. Um deles é o gestor de comunicações, responsável pela recepção e envio de dados pela porta série, o outro é o gestor da interface gráfica, que gere toda a informação visualizada e controlada na mesma.

De cada vez que o programa é corrido, é feita a separação de ambos os processos e a criação das *shared memories* de envio e recepção. Assim, de cada vez que é recebida uma mensagem na porta série, esta é colocada na *shared memory* de recepção, de modo a poder ser acedida pelo gestor da interface gráfica e fazer a actualização da interface. A *shared memory* de envio funciona no sentido contrário, em que sempre que há uma acção de controlo na interface gráfica esta é armazenada na *shared memory*, para o gestor de comunicações fazer o seu envio para a UGI. Este princípio de funcionamento encontra-se representado no diagrama da figura 4.12.

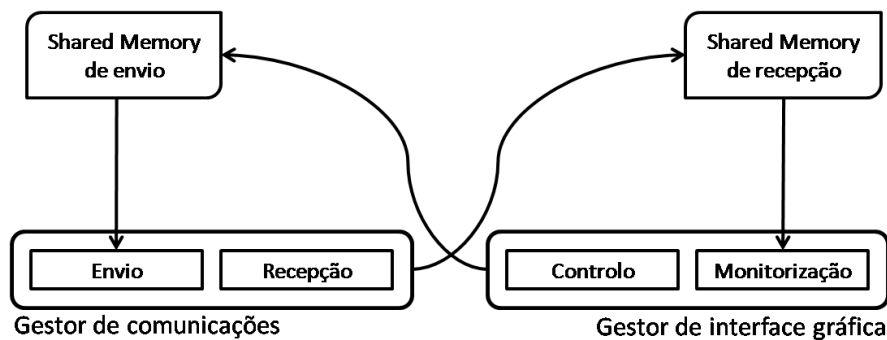


Figura 4.12: Diagrama representativo do funcionamento geral da interface remota.

Com este princípio dá-se uma maior robustez ao programa, uma vez que mesmo que a interface gráfica falhe, a recepção de informação na porta de série continua.

O gestor de comunicações, para além de gerir a porta de série, é responsável por fazer a codificação e a decodificação das mensagens, seguindo o protocolo comum já estabelecido.

A interface gráfica que permite a interacção com o utilizador é feita em GTK e, tal como está representado no diagrama da figura 4.1, permite efectuar o controlo e a monitorização dos diversos dispositivos do sistema. Para além disso, ainda permite a visualização da imagem adquirida pela câmara fotográfica.

Capítulo 5

Resultados e Conclusões

5.1 Aspectos construtivos

Com a construção do protótipo pretende-se validar as opções tomadas ao longo do seu projecto, bem como os conceitos definidos para o sistema. Apresentam-se, então, todos os elementos do sistema já concluídos, com as dificuldades associadas à sua obtenção e respectivo sucesso.

UGI

O sistema de placas de interface amovíveis definido para a UGI funcionou como esperado, permitindo a sua substituição quando necessário (figura 5.1). Com o fabrico das placas numa liga de alumínio verificou-se a rigidez necessária nos acoplamentos e uma boa estabilidade nas ligações aparafusadas.

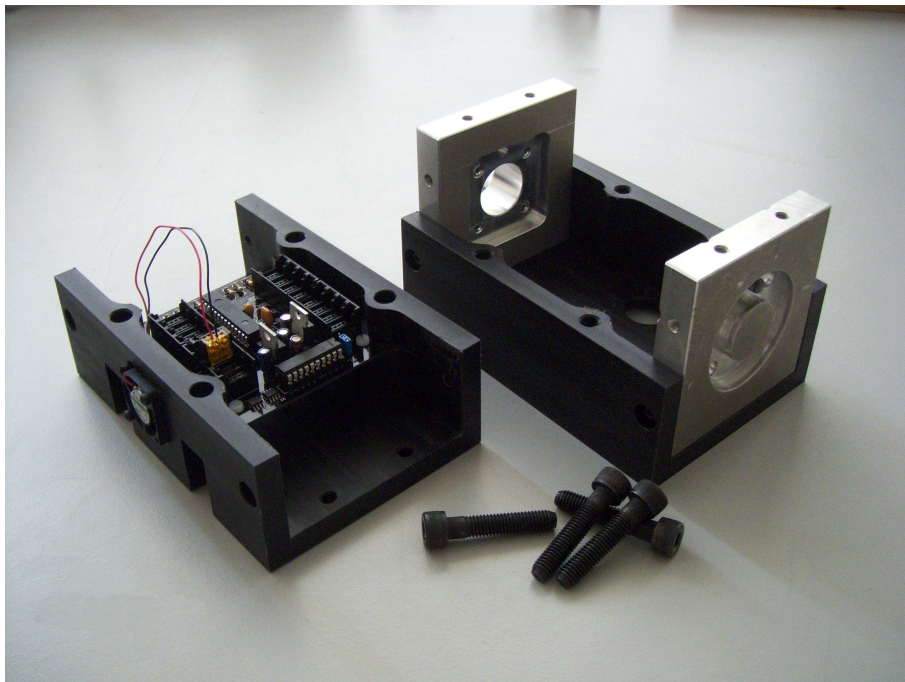


Figura 5.1: Fotografia da estrutura da UGI, placas de interface amovíveis e montagem da PCB.

A poliamida seleccionada para o fabrico do corpo da UGI revelou-se uma boa aposta, demonstrando a rigidez estrutural necessária, uma boa maquinabilidade e um bom acabamento superficial. No entanto, dois pequenos inconvenientes deste material surgiram. Constatou-se que a parafusagem no processo de maquinação das peças é bastante prejudicial à fresadora CNC e verificou-se uma ligeira deformação nas paredes laterais da estrutura, que dificulta o encaixe das placas amovíveis. Apesar disso, a montagem do conjunto revelou-se bastante sólida e a combinação híbrida da poliamida com o alumínio demonstrou ser uma boa opção.

O corpo da UGI engloba as peças mais complexas do conjunto, portanto a escolha do material e o recurso a ferramentas de CAD demonstrou ser um contributo importante para o projecto, reduzindo consideravelmente o tempo de fabrico das peças.

Unidade de visão

A construção da plataforma de ajuste da posição longitudinal da câmara e de suporte do anel de LEDs foi conseguida com sucesso (figura 5.2) e demonstrou a versatilidade para a qual foi desenhada. A calha de deslizamento permite a suave movimentação da placa de apoio da câmara e o sistema de travagem funcionou devidamente, efectuando a sua completa imobilização. Verificou-se ainda que, com a câmara utilizada, o sistema permite a troca fácil da lente.

O polietileno seleccionado para o fabrico da plataforma não demonstrou tão boa maquinabilidade como esperado, deixando um acabamento superficial razoável. Apesar disso, o baixo coeficiente de atrito do material contribuiu para o fácil deslizamento da câmara.

O suporte do anel de LEDs revelou-se estável e permite a sua remoção, quando necessário.



Figura 5.2: Fotografia da plataforma de ajuste da posição longitudinal da câmara e de fixação do anel de LEDs.

O sistema de controlo angular do ponteiro laser é bastante simples e funcionou como esperado (figura 5.3). Verificou-se que o servomotor é um pouco rápido para a realização de operações

de varrimento, sendo necessário efectuar o controlo do seu movimento no *software* da interface remota.

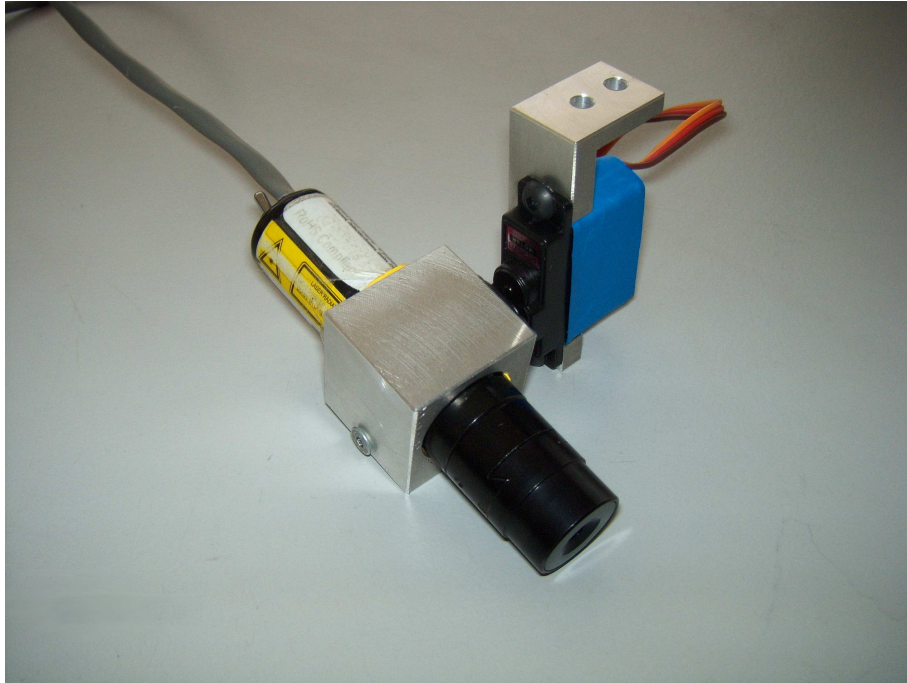


Figura 5.3: Fotografia do sistema de controlo angular do ponteiro laser.

Placas de circuito impresso

A construção das placas de circuito impresso é de elevada qualidade, demonstrando ser um bom investimento e facilitando o processo de soldadura, tanto dos componentes superficiais como dos *DIP*. Recorrendo a uma técnica de sopro de ar quente e a pasta de solda depositada nos contactos do componente, garantiu-se a soldadura dos componentes superficiais.

Os conectores seleccionados para fazer a ligação dos diversos dispositivos às PCBs demonstraram a robustez esperada e dão versatilidade ao sistema.

Devido à folga contemplada nos furos de fixação da placa à UGI não se verificou qualquer problema na sua montagem, compensando a ligeira deformação das paredes laterais da estrutura (figura 5.4).

Os diversos componentes electrónicos seleccionados comportaram-se como esperado, garantindo o sucesso do projecto de sistemas eléctricos e o funcionamento geral do sistema.

A montagem da PCB da unidade de actuação também correu como esperado (figura 5.5) e permite a demonstração do conceito de independência funcional deste protótipo.

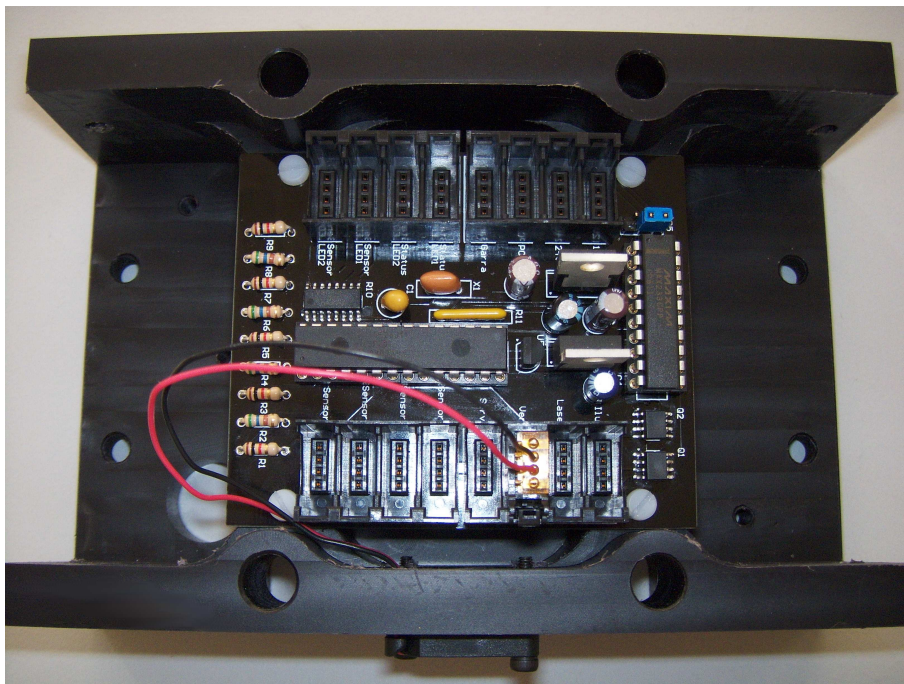


Figura 5.4: Fotografia da placa de circuito impresso da UGI.

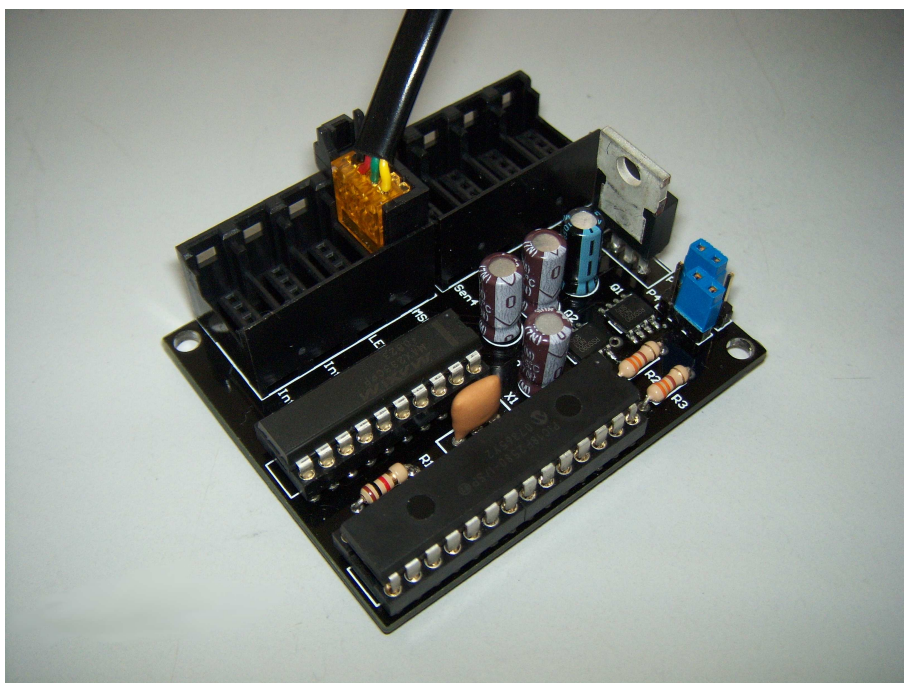


Figura 5.5: Fotografia da placa de circuito impresso da unidade de actuação.

5.2 Conclusões

O desenvolvimento deste protótipo teve como objectivo a construção de um sistema que contemple, numa plataforma única, a resolução dos diversos problemas e lacunas observados nos sistemas de *bin-picking* actualmente existentes. A obtenção de uma unidade de interface versátil foi o ponto crucial deste trabalho, indo ao encontro do conceito de independência funcional das unidades de visão e de actuação. Pretendeu-se com isso, a criação de uma ferramenta de trabalho altamente flexível e robusta, que permita a abordagem a diferentes aplicações de *bin-picking* de um modo simples e prático.

Com a construção e montagem do protótipo verificou-se a flexibilidade do sistema. As placas de interface amovíveis permitem a fácil adaptação da UGI a um grande número de manipuladores e a uma gama de garras bastante larga.

Fisicamente, o protótipo demonstrou rigidez e robustez, validando a sua aplicabilidade em ambientes cuja a implementação de um sistema de *bin-picking* seja possível.

Toda a automação do sistema garante a comunicação entre as diversas unidades, atribuindo-lhe as funcionalidades de auto-reconhecimento, segurança e diagnóstico e *feedback* sensorial. Com o protocolo implementado, o sistema permite reconhecer a presença da unidade de actuação, sendo capaz de distinguir qual a garra acoplada. As informações sensoriais extrínsecas e intrínsecas são devidamente adquiridas pela respectiva unidade, e a sua gestão, por parte da UGI, é feita com sucesso, permitindo à interface remota a sua monitorização e o controlo do sistema, tanto para questões de segurança como para o processo de de abordagem e recolha da peça.

A unidade de actuação utilizada para demonstração permitiu a validação do conceito de independência funcional, mostrando a flexibilidade e versatilidade esperadas para a UGI.

De um modo geral, pode-se concluir que a construção do protótipo foi feita com sucesso e que o funcionamento básico do sistema foi conseguido. Assim, abrem-se novas portas para a realização de diversos trabalhos nesta área e para a aplicação deste conceito em inúmeras aplicações de *bin-picking*.

5.3 Trabalhos futuros

Um protótipo deste tipo é o primeiro passo para o desenvolvimento de inúmeros trabalhos na área do *bin-picking*, deixando em aberto inúmeras oportunidades para demonstrar a suas potencialidades. Inúmeros testes e ensaios terão ainda que ser realizados, de modo a detectar possíveis falhas no protótipo e a realizar melhoramentos a nível de *software* e/ou *hardware*. Apesar disso, algumas ideias e sugestões surgiram tendo em vista a evolução e o melhoramento do sistema.

De modo a validar o conceito de independência funcional, o desenvolvimento de outras unidades de actuação que se adequem a aplicações específicas de *bin-picking* seria essencial. Com isso demonstrar-se-ia a finalidade para que este protótipo foi desenvolvido e a flexibilidade a ele associada.

Tendo em conta a evolução do protótipo, a inclusão de um sistema pneumático de acoplamento de garras, na UGI, seria uma mais valia. Com isso garantir-se-ia a universalidade no acoplamento da unidade de actuação, funcionando segundo um princípio de *plug-and-play* em que a troca automática de ferramenta seria possível, podendo-se realizar diferentes tarefas na mesma célula de trabalho.

Tendo ainda em vista a abordagem a ambientes não-estruturados com alguma complexidade, aplicar o controlo de força na UGI seria também uma mais valia. Indo ao encontro do conceito de

feedback sensorial não-visual, com esse controlo seria possível fazer a recolha de peças complexas e podendo-se, até, efectuar operações de montagem.

Apêndice A

Amostra de manipuladores

Tabela A.1: Amostra de manipuladores estudada.

Marca	Modelo	Acoplamento	ϕ_{ext} (mm)	Payload (kg)
Fanuc	ARC Mate 50iC/5L	1	40	5
	ARC Mate 100iBe	1	50	6
	ARC Mate 100iC/100iC6L	2	62	10/6
	ARC Mate 120iC/120iC-10L	2	62	20/10
	LR Mate200iC Series w R-30iA	1	40	5
	M-10iA Series	2	62	10/6
	M-20iA Series	2	62	20/16
Staubli	RX130	1	50	6
	RX160/RX160L	1	63	20/14
	RX170/RX170L/RX170HP	2	100	30/20/60
	TX40	1	40	1,7
	TX60/TX60L	1	40	3,5/2
	TX90/TX90L/TX90XL	1	63	7/6/5
Motoman	HP3L	1	40	3
	HP3XF/HP5	1	40	3/5
	HP6S	1	50	6
	HP20/HP20-6	1	50	20/6
ABB	IRB 140	1	50	6
	IRB 1410	1	50	5
	IRB 1600-6/IRB 1600-8	1	50	6/8,5
	IRB 1600ID	1	80	4
	IRB 260	2	100	30
	IRB 2400-16/IRB 2400-10/IRB 2400L	2	63	20/12/7

Tabela A.2: Repetibilidade dos manipuladores da amostra analisada.

Marca	Modelo	Repetibilidade (mm)
Fanuc	ARC Mate 50iC/5L	0.03
	ARC Mate 100iBe	0.08
	ARC Mate 100iC/100iC6L	0.08
	ARC Mate 120iC/120iC-10L	0.08
	LR Mate200iC Series w R-30iA	0.02
	M-10iA Series	0.08
	M-20iA Series	0.08
Staubli	RX130	0.05
	RX160/RX160L	0.05
	RX170/RX170L/RX170HP	0.04
	TX40	0.02
	TX60/TX60L	0.03
	TX90/TX90L/TX90XL	0.04
Motoman	HP3L	0.04
	HP3XF/HP5	0.03
	HP6S	0.08
	HP20/HP20-6	0.06
ABB	IRB 140	0.03
	IRB 1410	0.05
	IRB 1600-6/IRB 1600-8	0.05
	IRB 1600ID	0.02
	IRB 260	0.10
	IRB 2400-16/IRB 2400-10/IRB 2400L	0.06

Apêndice B

Simulações numéricas

Tabela B.1: Estimativa de peso para a UGI.

Componente	Peso (<i>kgf</i>)
Câmara + lente	0.200
Anel de <i>LEDs</i>	0.165
Ponteiro laser	0.070
Servo + acessórios	0.060
Conectores + electrónica	0.700
Estrutura	1.100
Outras peças	0.200
Total	≈ 2.500

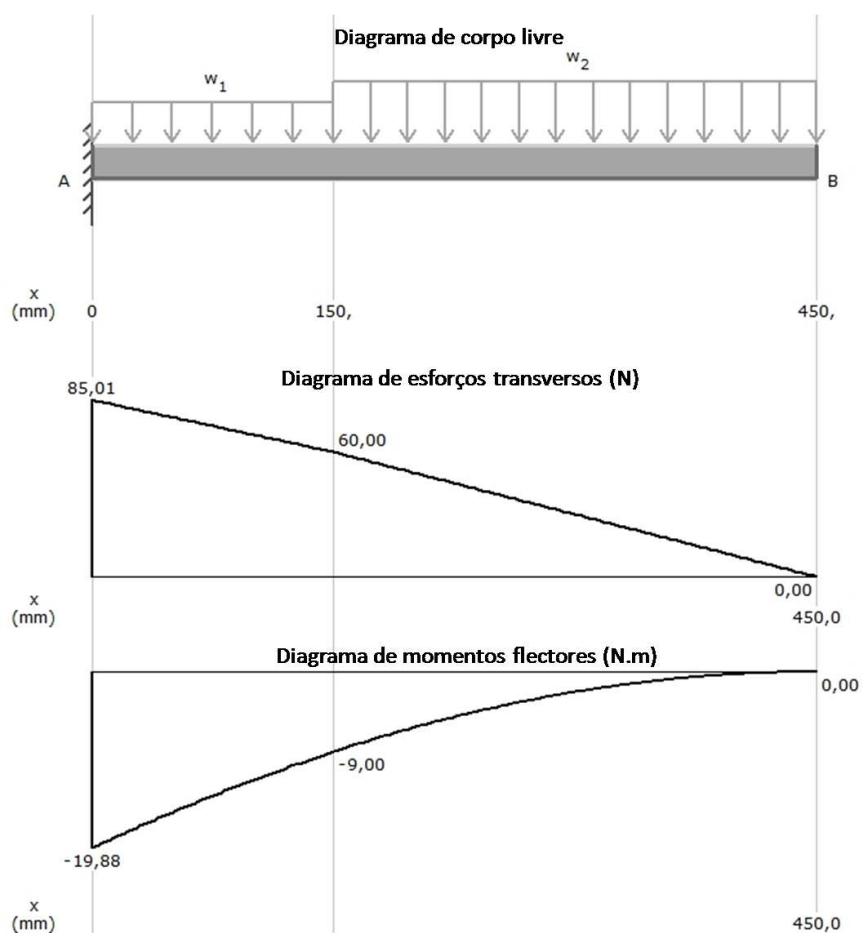


Figura B.1: Diagramas de esforços transversos e de momentos flectores, para as condições de simulação numérica ($w_1 = 166.7 \text{ N/m}$ e $w_2 = 200 \text{ N/m}$).

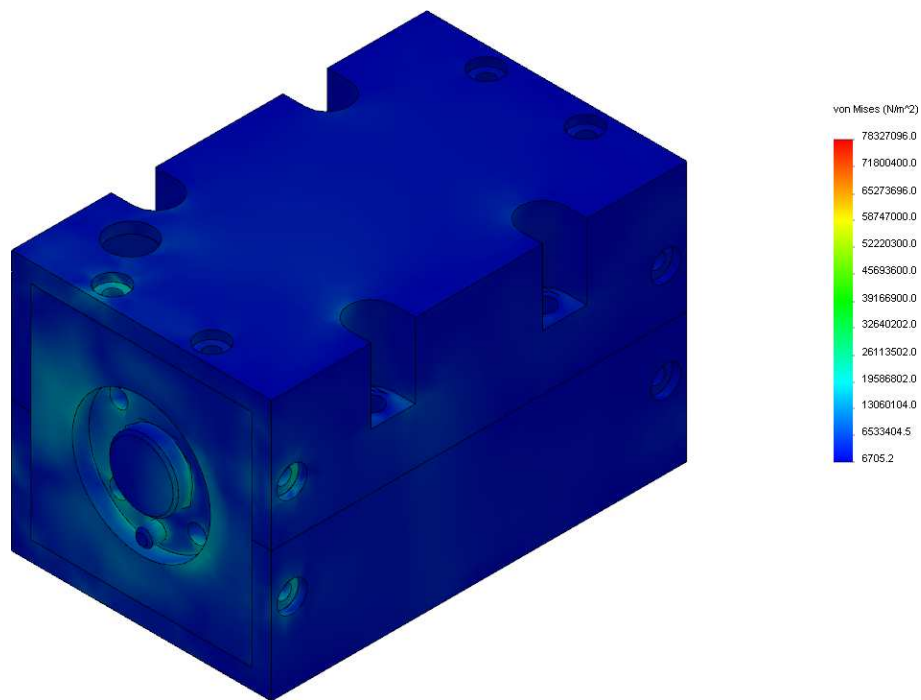


Figura B.2: Resultados da tensão de vonMises para a estrutura totalmente em alumínio.

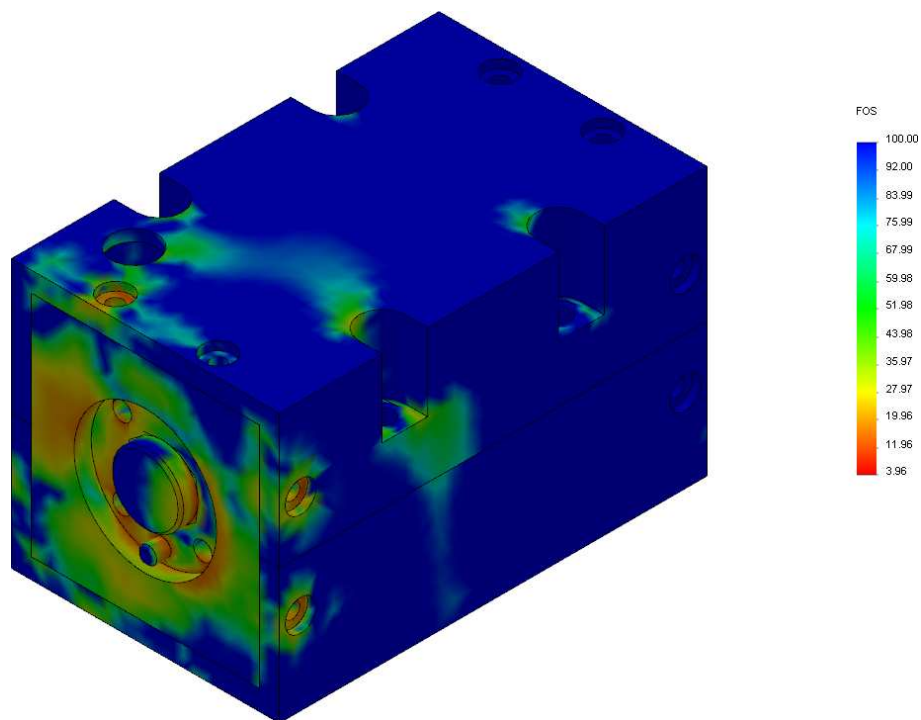


Figura B.3: Resultados do coeficiente de segurança para a estrutura totalmente em alumínio.

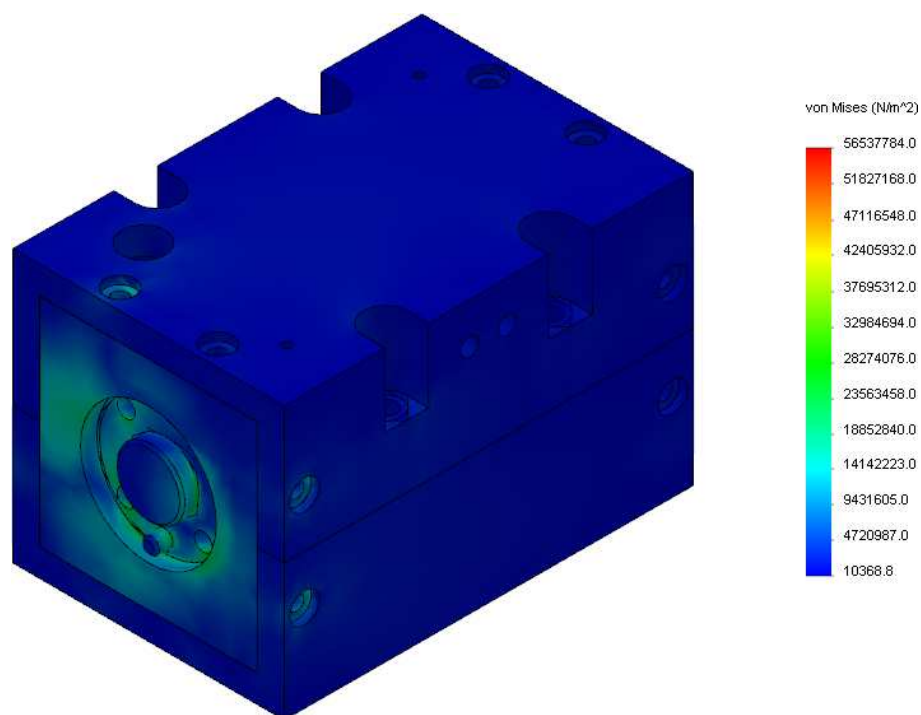


Figura B.4: Resultados da tensão de vonMises para a estrutura híbrida de alumínio e poliamida.

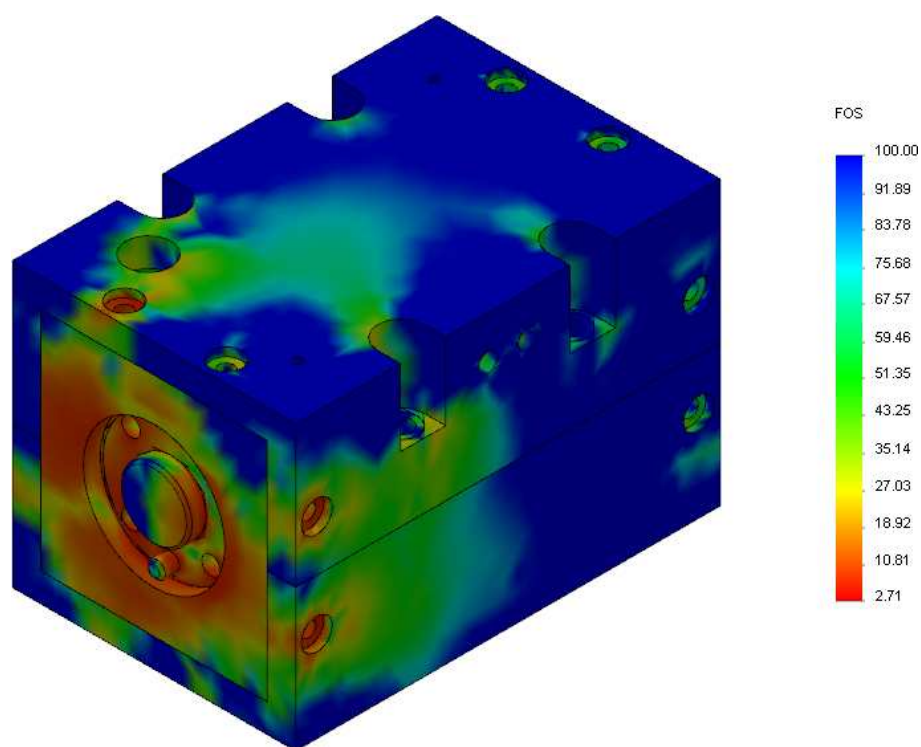
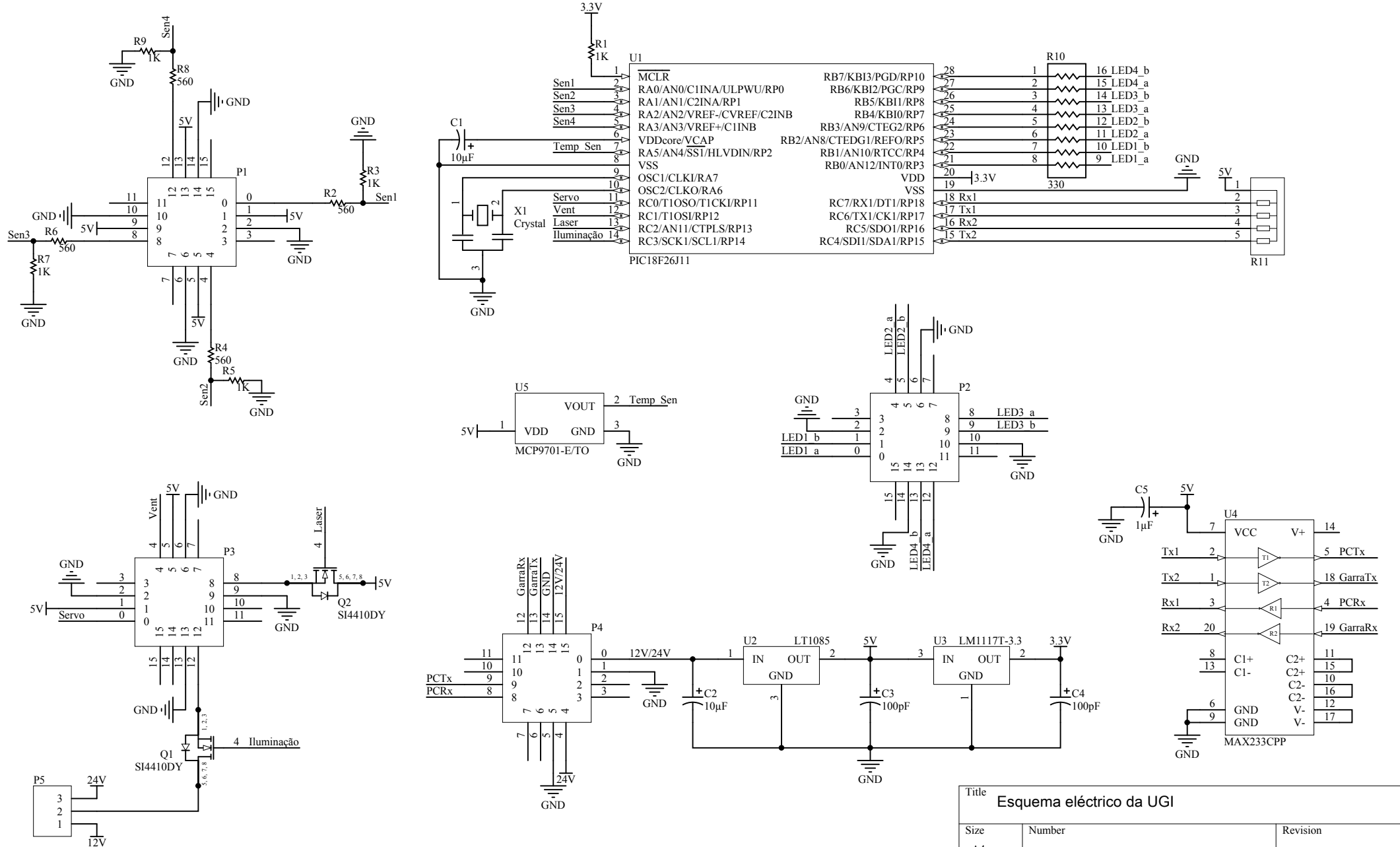


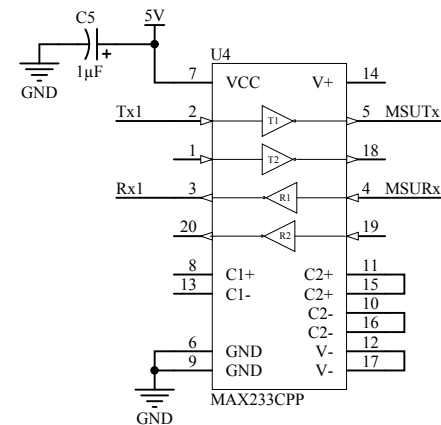
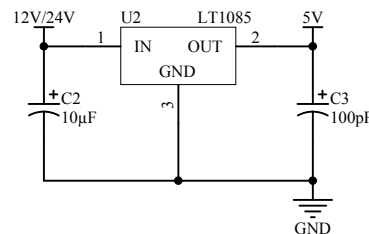
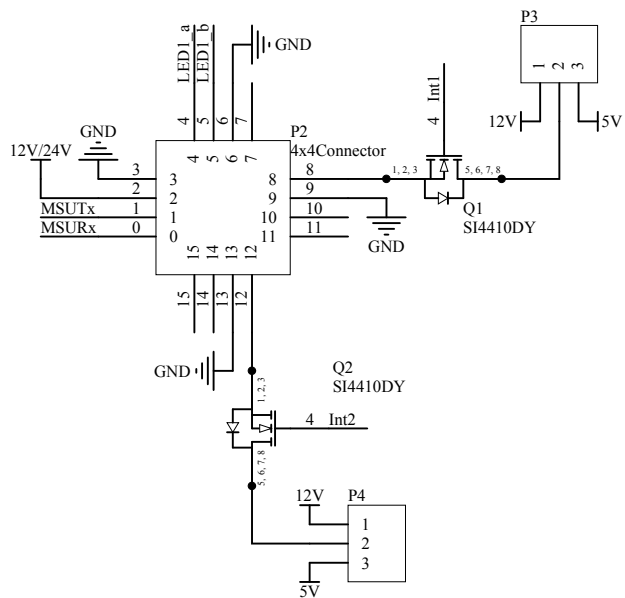
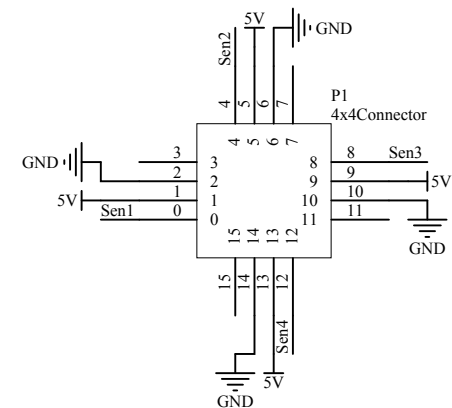
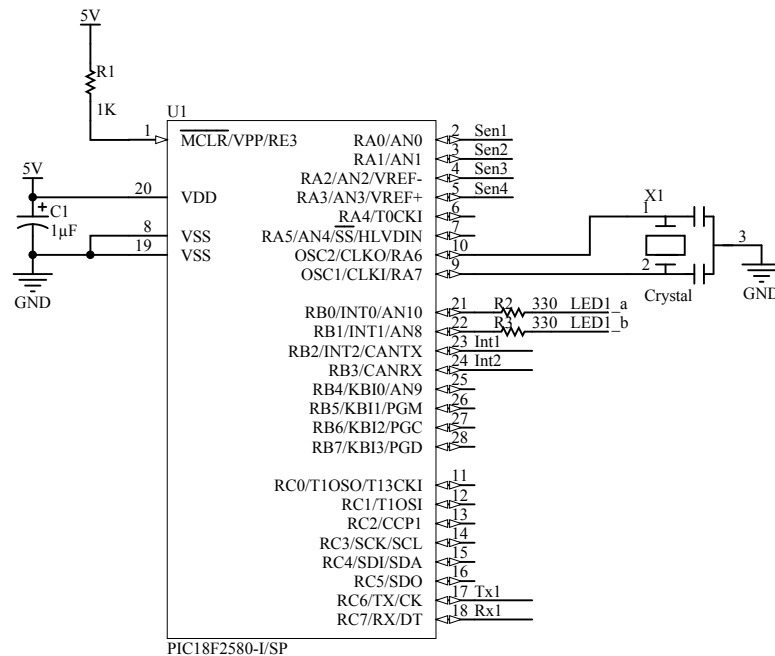
Figura B.5: Resultados do coeficiente de segurança para a estrutura híbrida de alumínio e poliamida.

Apêndice C

Esquemas eléctricos



Title		
Esquema eléctrico da UGI		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	02-07-2009	Sheet of
File:	C:\Users\...\Esquema electrico principal.SCH	
	Drawn By:	



Title		
Esquema eléctrico da unidade de actuação		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	02-07-2009	Sheet of
File:	C:\Users\...\Esquema_garra1.SchDoc	Drawn By:

Referências

- [1] Electric. Braintech releases random bin picking software. *Robotics Trends*, Março 2008.
- [2] Winn Hardin. Vision enables freestyle bin picking. *Vision Systems Design*, Junho 2007.
- [3] Winn Hardin. Quick pick. *Vision Systems Design*, September 2008.
- [4] Wes Iversen. Vision-guided robotics: In search of the holy grail. *Automation World*, Fevereiro 2006.
- [5] Danica Kragic and Henrik I Christensen. Survey on visual servoing for manipulation. Technical report, Computational Vision and Active Perception Laboratory, 2002.
- [6] D. T. Pham and S. H. Yeo. Strategies for gripper design and selection in robotic assembly. *Int. J. Prod. Res.*, 1991.